MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



AZ IPAR 4.0 ÉS A DIGITALIZÁCIÓ SZEREPE A LOGISZTIKAI RUGALMASSÁG NÖVELÉSÉBEN

PH.D. ÉRTEKEZÉS

Készítette:

Járvás Tamás
okleveles gépészmérnök (BSc)
okleveles logisztikai mérnök (MSc)

Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola
Anyagáramlási rendszerek és logisztikai informatika tématerület
Logisztikai Intézet

Doktori Iskola vezető
Prof. Dr. Kovács László
egyetemi tanár

Tématerület vezető
Prof. Dr. Illés Béla
egyetemi tanár

Témavezető
Prof. Dr. Illés Béla
egyetemi tanár

Társtémavezető
Dr. Bányainé Prof. Dr. Tóth Ágota
egyetemi tanár

Miskolc
2026

NYILATKOZAT

Alulírott Járvás Tamás kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalommal, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem. A dolgozat bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben a Miskolci Egyetem Dékáni Hivatalában lesz elérhető.

Miskolc, 2026. november 2.

……

Járvás Tamás

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai iránymutatásukkal, támogatásukkal és biztatásukkal hozzájárultak doktori értekezésem elkészítéséhez.

Mindenekelőtt tudományos vezetőimnek, Dr. Illés Béla Professzor Úrnak és Dr. Bányainé Dr. Tóth Ágota Professzor Asszonynak hálával tartozom. Köszönöm, hogy a kezdetektől hittek a kutatásomban és hogy iparban dolgozó doktoranduszként is olyan szellemi szabadságot adtak, amelyben a téma valóban kibontakozhatott. Legfőképpen a szakmai mentorálásukat köszönöm. Türelmes, következetes iránymutatásukkal újra és újra segítettek pontosabbá tenni a gondolataimat és mindvégig összekötötték a tudományos igényességet a gyakorlati hasznosíthatóság szempontjával. Tőlük nemcsak a dolgozat megírásához kaptam segítséget, hanem egy olyan kutatói szemléletet is, amelyet hosszú távon is magammal viszek.

Köszönöm a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézete munkatársainak a szakmai segítséget, a motiváló beszélgetéseket és a közvetlen, barátságos légkört. Köszönöm továbbá a Gépészmérnöki és Informatikai Kar, valamint a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola vezetésének, hogy megteremtették a kutatómunka feltételeit. Különösen értékes volt számomra, hogy támaszkodhattam az Intézet hazai és nemzetközi kapcsolatrendszerére, amely segített az elméleti eredményeket valós ipari környezetbe helyezni.

Végül feleségemnek, Melindának és fiamnak, Tominak tartozom külön köszönettel. Ez a dolgozat a munkám mellett készült, és a kutatásra fordított idő sokszor a családdal közösen tölthető esték, hétvégék és programok rovására ment. Melinda, köszönöm, hogy ezekben az években türelemmel és megértéssel támogattál és akkor is mellettem álltál, amikor a kutatás a tervezettnél jóval több időt és energiát igényelt. Tomi, köszönöm a megértésedet, különösen azokért az alkalmakért, amikor a dolgozat miatt le kellett mondanunk egy-egy közös programról. Tudom, hogy az elmúlt években sokszor kevesebb időm jutott rád, mint szerettem volna. Ígérem, most bepótoljuk.

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Járvás Tamás „AZ IPAR 4.0 ÉS A DIGITALIZÁCIÓ SZEREPE A LOGISZTIKAI RUGALMASSÁG NÖVELÉSÉBEN” c. PhD értekezéséhez

Járvás Tamás a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola Anyagáramlási rendszerek és logisztikai informatika tématerületéhez kapcsolódóan folytatta PhD tanulmányait. Kutatómunkája szorosan kapcsolódik szakmai tevékenységéhez, hiszen több mint 25 éves ipari tapasztalattal rendelkezik a választott kutatási területen. E jelentős szakmai háttér lehetővé tette számára, hogy a kutatási problémákat ne csupán elméleti megközelítésben, hanem a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából is vizsgálja.

Járvás Tamás PhD tanulmányai során nagyfokú szakmai elhivatottsággal, önállósággal és alapossággal végezte kutatómunkáját. Több évtizedes ipari tapasztalatára építve jól azonosította a vizsgált terület gyakorlati problémáit, és azok megoldására tudományosan megalapozott módszereket és megközelítéseket dolgozott ki. Kutatási tevékenységét az elméleti ismeretek és a gyakorlati tapasztalatok eredményes ötvözése jellemezte, amely különösen értékessé teszi tudományos munkáját.

Az értekezés Járvás Tamás önálló kutatási eredményeit tartalmazza, és megfelel a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola szabályzatában előírt követelményeknek. A disszertáció elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt értékes hozzájárulást jelent a vizsgált szakterület fejlődéséhez. Külön érdeme, hogy a tudományos eredmények olyan valós ipari problémákhoz kapcsolódnak, amelyek megoldása a vállalati gyakorlat számára is hasznosítható.

A dolgozat Járvás Tamás többéves kutatómunkájának eredményeit foglalja össze, mely alapján a jelölt részére a PhD-fokozat odaítélését messzemenően támogatjuk.

Miskolc, 2026. november 5.

Prof. Dr. Illés Béla
témavezető

Dr. Bányainé Prof. Dr. Tóth Ágota
társtémavezető

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés 5

2. A kutatási téma aktualitása és indokoltsága 6

3. Szakirodalmi áttekintés 9
   3.1. A kutatási terület tudománymetriai elemzése 9
      3.1.1. A kutatási terület időbeli fejlődésének elemzése 10
      3.1.2. A kutatási témák közötti kapcsolatok hőtérképes elemzése 11
      3.1.3. Relatív publikációs intenzitás elemzése 13
   3.2. A kutatási területhez kapcsolódó szakirodalom elemzése 15
      3.2.1. Keresleti bizonytalanság és az információ döntési értéke 15
      3.2.2. Az Ipar 4.0 és a Logisztika 4.0 működési képességei 17
      3.2.3. Digitális transzformáció és a vállalati digitális fejlettség értékelése 20
      3.2.4. A logisztikai rugalmasság tartalma és értékelése 22
      3.2.5. A postponement mint a bizonytalanság kezelésének stratégiája 24
      3.2.6. A digitális képességek hasznosulásának feltételei és korlátai 25
   3.3. A szakirodalom szintézise és a halasztási stratégia vizsgálatának megalapozása 26
   3.4. Kutatási rés azonosítása 29

4. A kutatás célkitűzései és a vizsgált főbb területek 31

5. A kutatás módszertani kerete 33

6. A logisztikai rugalmasság vállalati jellemzői és az Ipar 4.0 szerepe 36
   6.1. A logisztikai rugalmasság vizsgálatának célja és indokoltsága 36
   6.2. A logisztikai rugalmasság vizsgálatának módszertana 36
   6.3. A logisztikai rugalmasság vizsgálatának eredményei 37
   6.4. Összegzés és tézis 45

7. A halasztási stratégia szerepe a modern logisztikában 46
   7.1. A halasztási stratégia vizsgálatának célja és indokoltsága 46
   7.2. A halasztási stratégia vizsgálatának módszertana 47
   7.3. A halasztási stratégia vizsgálatának eredményei 47
   7.4. Összegzés és tézis 54

8. A Digitális Fejlettségi Index megalkotása 56
   8.1. A DFI megalkotásának célja és indokoltsága 56
   8.2. DFI megalkotásának módszertana 57
      8.2.1. Adatforrás és elemzési egység 57
      8.2.2. A komponensek és a pontozás 57
      8.2.3. A dimenziók és a súlyok indoklása 59
      8.2.4. A Digitális Fejlettségi Szint (DFS) 59
      8.2.5. Statisztikai eljárások 60
   8.3. A DFI-vel végzett vizsgálatok eredményei 61
      8.3.1. A komponensek leíró statisztikái 61
      8.3.2. A DFI eloszlása és a Digitális Fejlettségi Szintek 63
      8.3.3. Az index belső szerkezete és robusztussága 63
      8.3.4. Az index érvényessége 64

8.3.5. Vállalati profilok 66
8.3.6. A DFI és a halasztási stratégia kapcsolata 68
8.3.7. A digitális fejlettség és a logisztikai rugalmasság kapcsolata 69
8.4. Összegzés és tézis 70
9. A digitalizált postponement logisztikai rendszer 72
9.1. A digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modellje 72
9.1.1. Fogalmi alapok és rendszerhatár 72
9.1.2. A modell szerkezete 74
9.1.3. A digitális információs és döntéstámogató rendszer 76
9.1.4. A folyamatszakaszok 79
9.1.5. Erőforrások és működési korlátok 81
9.1.6. Külső kapcsolatok 83
9.1.7. A modell elemei közötti összefüggések 84
9.1.8. A modell feltételezései, érvényességi köre és korlátai 88
9.1.9. Összegzés és tézis 89
9.2. A postponement logisztikai rendszer operatív optimalizálásának matematikai modellje és flexibilitási mutatói 90
9.2.1. A vizsgált postponement logisztikai rendszer általános matematikai modellje 90
9.2.2. Flexibilitási mutatók 99
9.2.3. Összegzés és tézis 105
10. Összefoglalás 106
11. Summary 108
12. Az értekezés tézisei 110
13. Theses of the dissertation 112
14. Irodalomjegyzék 114
14.1. Az értekezés témakörében használt saját publikációk 114
14.2. Az értekezés témakörében használt idegen publikációk 115
15. Ábrajegyzék 122
16. Táblázatjegyzék 124

1. BEVEZETÉS

Egy gyártóvállalat akkor is szembesülhet kiszolgálási nehézségekkel, ha összességében elegendő készlettel és termelési kapacitással rendelkezik. Ha a kereslet mennyisége, összetétele vagy időzítése eltér az előrejelzéstől, egyes termékekből felesleg, másokból hiány keletkezhet. Nagy keresleti bizonytalanság esetén ezért az a kérdés, hogyan igazíthatók a termelési és logisztikai folyamatok a változó igényekhez a kiszolgálási színvonal fenntartása és az erőforrások gazdaságos felhasználása mellett.

A logisztikai rugalmasság azt jelenti, hogy a vállalat képes anyagáramlási és kiszolgálási folyamatait a megváltozott feltételekhez igazítani. Az alkalmazkodáshoz időben rendelkezésre álló, megbízható információ szükséges a keresletről, a készletekről és a kapacitásokról. Az Ipar 4.0 a fizikai folyamatok és az információs rendszerek összekapcsolásával segítheti az alkalmazkodáshoz szükséges döntések meghozatalát [P1]. A technológiák hasznosulását a szervezeti működés és az adatok felhasználása is befolyásolja, ezért a digitális fejlettség többdimenziós vizsgálatot igényel.

A keresleti bizonytalanság kezelésének egyik eszköze a halasztási (postponement) stratégia. Ennek során a termék végső kialakítását, csomagolását vagy egyes logisztikai műveleteket olyan időpontra halasztják, amikor pontosabb keresleti információk állnak rendelkezésre. Ez mérsékelheti a készletkockázatot és támogathatja a vevői igényekhez való alkalmazkodást [P2]. A késleltetett műveletek határidőre történő végrehajtásához azonban összehangolt anyagellátás, megfelelő kapacitás és megbízható információáramlás szükséges. A digitális képességek e feltételek összehangolását támogathatják [P3].

A digitális képességek és a vállalatok tényleges logisztikai gyakorlata közötti kapcsolat ugyanakkor további vizsgálatot igényel. A kutatás egyik kérdése, hogy a vállalat átfogó digitális fejlettsége milyen összefüggést mutat a halasztási stratégia alkalmazásával. A logisztikai rugalmasság vállalati jellemzőit és a digitalizáció megítélt szerepét a kérdőíves önértékelések alapján vizsgálom. E kérdés megválaszolásához a digitális fejlettség mérhető leírása és a vállalati működés empirikus elemzése szükséges.

Értekezésem célja annak feltárása, hogy az Ipar 4.0 és a digitalizáció milyen módon támogathatja a logisztikai rugalmasság növelését nagy keresleti bizonytalanság esetén. A digitális fejlettség összehasonlító értékeléséhez Digitális Fejlettségi Indexet (DFI) dolgoztam ki. További célom a digitalizált postponement rendszer működési és matematikai döntéstámogató modelljének kialakítása, valamint a rugalmasság számszerű értékelésére alkalmas mutatórendszer kidolgozása. Ez a megközelítés a vállalati szintű vizsgálatot olyan operatív kérdésekhez kapcsolja, mint a rendelkezésre álló erőforrások mellett teljesíthető rendelési volumen meghatározása.

A kutatás elméleti alapját szakirodalmi áttekintés és tudománymetriai elemzés adja. Az empirikus vizsgálat egy 2025-ben végzett kérdőíves felmérésre épül, amelyben 27 magyarországi vállalat logisztikával vagy ellátásilánc-menedzsmenttel foglalkozó döntéshozója vett részt [S2]. Az elemzések a logisztikai rugalmasság vállalati megítélésére, a digitális fejlettség és a halasztási stratégia kapcsolatára, valamint a vállalati mintázatok feltárására irányulnak. Az eredményeket a kutatás feltáró jellegének és a minta korlátainak figyelembevételével értelmezem.

Az értekezésben a téma aktualitásának bemutatását a szakirodalmi háttér és a kutatási hiányok feltárása követi. A célkitűzések és a módszertani keret ismertetése után a 6-8. fejezet a logisztikai rugalmasság, a halasztási stratégia és a digitális fejlettség empirikus elemzését mutatja be. A 9. fejezet a digitalizált postponement rendszer működési és optimalizálási modelljét, valamint rugalmasságának értékelését mutatja be. A dolgozatot az eredmények és a tudományos tézisek összegzése zárja.

2. A KUTATÁSI TÉMA AKTUALITÁSA ÉS INDOKOLTSÁGA

Az életminőség javítására irányuló törekvés az ipari fejlődés egyik ösztönzője. Az ipar történelme során a növekvő és egyre összetettebb igények kielégítése új technológiák és termelési megoldások kialakulását ösztönözte. Az ipari forradalmak során a kommunikáció, az energiafelhasználás és a mobilitás fejlődése az üzleti és termelési modelleket is átalakította. A 21. században a fizikai berendezések, valamint az elektronikai és informatikai rendszerek összekapcsolása megteremtette az Ipar 4.0 technológiai alapjait. Az Ipar 4.0 ipari jelentőségét a fizikai folyamatok és az információs rendszerek integrációja, valamint az adatokra épülő, gyorsabb alkalmazkodás lehetősége adja [P1].

Az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó eszközök és rendszerek, így a mesterséges intelligencia, a nagy adathalmazok elemzése, a dolgok internete és a digitális ikrek a folyamatok megfigyelését és az adatokra épülő döntéshozatalt támogathatják a vállalati gyakorlatban. Ezzel párhuzamosan a nemzetközi ellátási láncok összetettsége, a piaci verseny és a fogyasztói igények változása nehezíti a termelési és logisztikai folyamatok tervezését. A kutatás szempontjából ezért az a kérdés, hogyan használhatók fel a digitális technológiák a vállalatok alkalmazkodóképességének javítására.

Az elmúlt évek makrogazdasági és geopolitikai eseményei, különösen a COVID-19 járvány, az orosz-ukrán háború és az inflációs hullámok a vállalati tervezés feltételeit is megváltoztatták. A keresleti változások ellátási zavarokkal és költségnövekedéssel együtt jelentkezhetnek, ami szükségessé teszi a korábbi tervek felülvizsgálatát. Az ellátási láncok rezilienciájának, vagyis a zavarok kezelésére és a működés helyreállítására való képességének vizsgálatában ezért a rugalmasság, az agilitás és a gyors válaszképesség kapcsolata is hangsúlyossá vált [P4]. Az értekezés ezen összetett problémakörön belül a keresleti bizonytalansághoz való logisztikai alkalmazkodásra összpontosít.

Korábbi szakirodalmi áttekintésemben a keresleti bizonytalanságot az ellátási és a belső folyamatbizonytalansággal együtt vizsgáltam. Davis felosztása, valamint Mason-Jones és Towill irányítási bizonytalansággal kiegészített megközelítése alapján a keresleti jelzések feldolgozása és termelési tervvé alakítása is az alkalmazkodás lényeges feltétele.

A termelésben a keresleti eltérések megváltoztathatják a gyártási sorrendet, a sorozatnagyságokat és a kapacitások terhelését. A gyakoribb átállások csökkenthetik a tényleges termelésre fordítható időt, a sürgős rendelések beillesztése pedig más rendelések teljesítését késleltetheti. A tervezettnél nagyobb kereslet túlórát vagy erőforrás-átrendezést tehet szükségessé, míg a kereslet visszaesése kihasználatlan kapacitást és magasabb fajlagos költséget eredményezhet. A termékmix változása összességében elegendő kapacitás mellett is szűk keresztmetszetet hozhat létre, ha az új összetétel más gépeket, munkaállomásokat vagy munkavállalói kompetenciákat igényel [S3].

A logisztikában a kereslet változása készletfelesleg és készlethiány egyidejű kialakulásához vezethet. A korábbi előrejelzések alapján beszerzett anyagok vagy előállított termékek egy része leköti a tőkét és a tárolókapacitást, miközben a ténylegesen igényelt változatokból hiány keletkezhet. A gyártási program módosításához a belső anyagellátásnak is igazodnia kell: változhat a komissiózási feladatok sorrendje, az anyagmozgató eszközök terhelése és a kiszolgáláshoz szükséges létszám. Az ismételt átrendezések, a sürgősségi szállítások és a kisebb tételekben történő kiszolgálás többletköltséget okozhatnak. Így a hatások a beszerzéstől a vevői kiszolgálásig a teljes folyamatot érinthetik.

A problémát az ellátási láncon belüli információtorzulás tovább erősítheti. Az ostorcsapás-effektus során a végső kereslet ingadozásánál nagyobb rendelési ingadozás jelenhet meg az ellátási lánc beszállítói felé haladva. Ennek lehetséges okai között a szakirodalom [P5] azonosítja a keresleti jelzések feldolgozását, a rendelések kötegelését, az árváltozásokat és a hiányhelyzetekben alkalmazott rendelési magatartást. A vállalatok így olyan rendelési jelekre is reagálhatnak, amelyek részben a partnerek készletezési és rendelési döntéseit tükrözik. Ez indokolja a keresleti információk és az anyagáramlás összehangolt vizsgálatát.

A logisztikai rugalmasság a vállalat logisztikai rendszerének azon képessége, hogy a kiszolgálási színvonal fenntartására törekedve alkalmazkodjon a megváltozott feltételekhez. A nagyobb biztonsági készlet vagy a tartalékkapacitás javíthatja az alkalmazkodás lehetőségét, fenntartásuk azonban költséggel jár. A kutatás gyakorlati indokoltságát ezért az a kérdés is adja, hogyan növelhető a reagálóképesség a rendelkezésre álló erőforrások gazdaságos felhasználása mellett. Ehhez a kereslet változásának felismerését össze kell kapcsolni a végrehajtható termelési és logisztikai válaszokkal.

Nagy keresleti bizonytalanság esetén felértékelődhet a megbízható és időben rendelkezésre álló információ, mert csökkentheti a hibás készletezési és kapacitásdöntések várható következményeit. A kétszintű ellátási láncot vizsgáló modell [P6] szerint a keresleti információ megosztásának előnye nagyobb lehet magas keresleti variancia, erősebb időbeli keresleti korreláció és hosszabb utánpótlási idő mellett. Az eredmény a vizsgált modell feltételeire érvényes, az információ értékét a kereslet jellemzői, az átfutási idők és a döntési lehetőségek együttesen alakítják.

Az információ időzítésének jelentősége egy egyszerű működési helyzettel szemléltethető. Ha egy rendelésváltozás az anyagok előkészítése és a gyártás megkezdése előtt ismertté válik, még módosítható a sorrend és az erőforrások hozzárendelése. Ha ugyanez az információ csak az előkészítés után érkezik meg, a korrekció ismételt anyagmozgatást, átállást vagy késedelmet okozhat. Az információs késés csökkentése így több időt hagyhat a beavatkozásra. A digitális megoldások ezzel a döntések és a fizikai végrehajtás közötti időbeli összhangot is támogathatják.

Az információ hasznosulásához ugyanakkor megfelelő adatminőség és szervezeti működés szükséges. A különálló rendszerekben tárolt, eltérő időpontban frissített készlet- és kapacitásadatok megnehezíthetik a közös helyzetértékelést. A döntésekhez a keresleti jelzéseket a tényleges készletekkel, a folyamatban lévő feladatokkal és a rendelkezésre álló erőforrásokkal együtt kell értelmezni. Az acatech érettségi modellje is összekapcsolja az információs rendszerek fejlődését az erőforrások, a szervezeti struktúra és a kultúra fejlesztésével [P1].

Az informatikai fejlesztések értékelésénél a fizikai folyamatok változását is figyelembe kell venni. A hivatkozott készletgazdálkodási modellben [P7] az átfutási idők és a rendelési tételnagyságok csökkentése a vizsgált esetekben nagyobb költségelőnnyel járt, mint az információmegosztás önmagában. Az eredmény az adatellátás és a működési képességek együttes fejlesztése mellett szól. Bár az automatizáció, a robotika és a digitális adatkezelés támogathatja a rugalmasságot, a megvalósítást az anyagi, technológiai és humán erőforrások hiánya, valamint a rendszerek integrációjának nehézségei korlátozhatják.

A keresleti bizonytalanság kezelésének egyik lehetséges eszköze a halasztási (postponement) stratégia. Ennek során bizonyos tevékenységeket, például a végső összeszerelést vagy csomagolást későbbi időpontra halasztanak, amikor már pontosabb keresleti információk állnak rendelkezésre. A közös alapkomponensek későbbi differenciálása mérsékelheti annak

kockázatát, hogy a vállalat a nem megfelelő termékváltozatból halmozzon fel készletet. A halasztás és a logisztikai rugalmasság kapcsolatát a működési környezet is alakítja. Kiskereskedelmi környezetben végzett empirikus vizsgálat szerint ez az összefüggés a keresleti bizonytalanság és a logisztikai integráció mértékétől is függ [P2].
A halasztás egyúttal szorosabb időbeli összehangolást követelhet meg. A későbbre halasztott műveleteket a vevő által elfogadott határidőn belül kell teljesíteni, ezért az anyagellátás és a végrehajtó kapacitás rendelkezésre állása a határidők betartásának feltétele. A digitális támogatás segítheti a rendelések, készletek és műveleti státuszok összehangolását, valamint a prioritások módosítását. Egy kiskereskedelmi gyártóvállalatokat vizsgáló empirikus kutatás pozitív kapcsolatot talált az informatikai képességek és a halasztási stratégia között, valamint kimutatta a halasztás közvetítő szerepét az informatikai képességek és az ellátási lánc életképessége közötti összefüggésben [P3]. E kapcsolatrendszer további vizsgálata indokolt, különösen a vállalati digitális fejlettség és az operatív megvalósítás együttes értékelésével.
A digitális fejlettség több dimenziójának összehasonlítható értékelését strukturált mutatók segíthetik. Ezt a célt szolgálja az értekezésben kialakított Digitális Fejlettségi Index. A vállalati szintű elemzés mellett a digitalizált postponement rendszer működésének modellezése annak vizsgálatát teszi lehetővé, hogyan kapcsolódnak egymáshoz az anyag-, információ- és döntési folyamatok. Az operatív döntéstámogatás gyakorlati kérdése, hogy adott erőforrásokkal mekkora rendelési volumen teljesíthető és hogyan változik ez a működési feltételek módosulásával. Ez kapcsolja össze a kutatás empirikus és modellezési irányát.
A bemutatott problémák indokolják az Ipar 4.0, a digitalizáció és a digitális fejlettség, a logisztikai rugalmasság, valamint a halasztási stratégia közötti kapcsolatok részletes vizsgálatát. E kapcsolatrendszer tudományos megalapozásához szükséges a kapcsolódó hazai és nemzetközi szakirodalom rendszerezett feltárása és elemzése, amelyet a következő fejezet mutat be.

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintés célja az értekezés kutatási területének elméleti megalapozása, valamint a vizsgált tématerületek közötti kapcsolatok feltárása. Ennek keretében feldolgoztam az Ipar 4.0 és a Logisztika 4.0 fogalmi és technológiai keretrendszerét, a digitalizáció, a vállalati digitális fejlettség, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia szakirodalmi hátterét.
A szakirodalmi vizsgálat két egymásra épülő részből áll. Elsőként tudománymetriai elemzéssel vizsgálom a kutatás szempontjából releváns tématerületek publikációs aktivitását, időbeli fejlődését és egymás közötti kapcsolatait. Ezt követően részletesen elemzem a kutatáshoz kapcsolódó fogalmakat, modelleket, technológiákat és összefüggéseket.
A fejezet végén a szakirodalmi eredmények szintézise alapján azonosítom a legfontosabb összefüggéseket és kutatási hiányterületeket, amelyekre az értekezés célkitűzései és vizsgálatai épülnek.

3.1. A kutatási terület tudománymetriai elemzése

A kutatási terület tudománymetriai elemzését a Scopus adatbázis felhasználásával végeztem el. Az adatbázis kiválasztását annak széles körű folyóirat-lefedettsége, egységes indexelési rendszere, valamint strukturált keresési lehetőségei indokolták. Ezek lehetővé teszik a kutatási trendek, a publikációs aktivitás, valamint a különböző kutatási témák közötti szakirodalmi kapcsolatok szisztematikus vizsgálatát. A vizsgálat a publikációszámokra, azok időbeli változására és a kutatási témák együttes előfordulására terjedt ki.
A Scopus adatbázisban a következő, a kutatás szempontjából releváns témakörök előfordulását és egymás közötti kapcsolatait vizsgáltam: Ipar 4.0, digitalizáció, digitális érettség, ellátási lánc, termelés vagy gyártás, Logisztika 4.0, logisztikai rugalmasság, postponement. Az egyes fogalmakhoz az alábbi keresőkifejezéseket alkalmaztam:

- Ipar 4.0: TITLE-ABS-KEY ("Industry 4.0"),
- Digitalizáció: TITLE-ABS-KEY ("digitalization") OR TITLE-ABS-KEY ("digitalisation") OR TITLE-ABS-KEY ("digital transformation") OR TITLE-ABS-KEY ("digitisation") OR TITLE-ABS-KEY ("digitization"),
- Digitális érettség: TITLE-ABS-KEY ("digital maturity"),
- Ellátási lánc: TITLE-ABS-KEY ("supply chain"),
- Termelés vagy gyártás: TITLE-ABS-KEY ("production") OR TITLE-ABS-KEY ("manufacturing"),
- Logisztika 4.0: TITLE-ABS-KEY ("logistics 4.0"),
- Logisztikai rugalmasság: TITLE-ABS-KEY ("logistics flexibility"),
- Postponement: TITLE-ABS-KEY ("postponement").

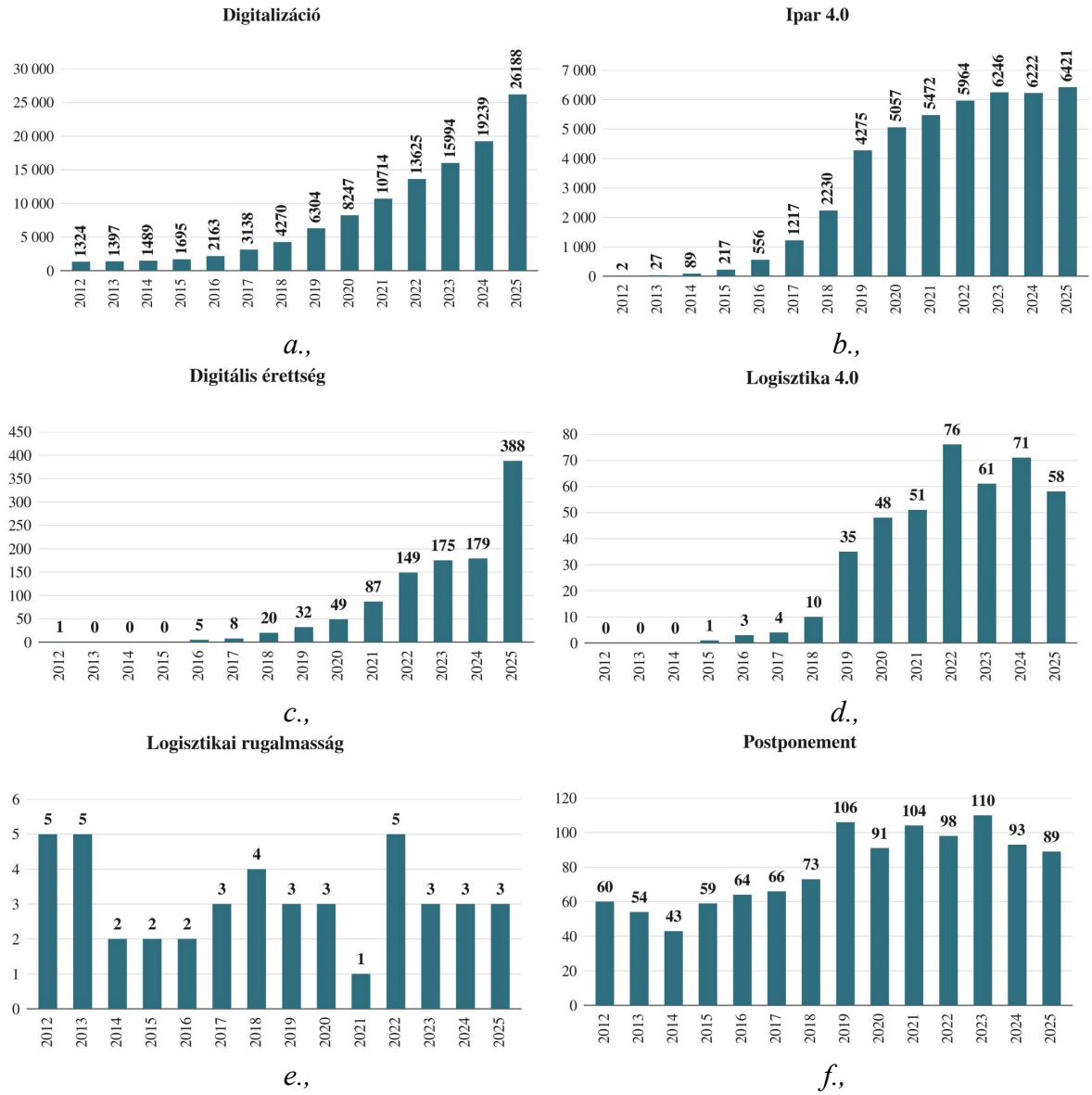
A keresések során az eredményeket az informatikai, a mérnöki, valamint a gazdaságtudományi szakterületekre szűkítettem (COMP, ENGI, BUSI, ECON), mivel a postponement kifejezés más tudományterületeken, például az egészségügyi kutatásokban is előfordul. A tématerületi szűkítés célja az volt, hogy az elemzés elsősorban a jelen kutatás szempontjából releváns szakirodalomra koncentráljon.
Az időbeli trendek elemzését a 2012 és 2025 között megjelent Scopus-indexelt publikációk alapján végeztem el. A kutatási témák közötti kapcsolatok hőtérképes elemzése és a relatív

publikációs intenzitás (RPI) vizsgálata ezzel szemben a Scopus adatbázisban a lekérdezés időpontjáig (2026. augusztus 5.) indexelt teljes publikációállomány alapján készült.
A tudománymetriai vizsgálat három egymásra épülő elemzési lépésből áll. Elsőként a kutatás közvetlen elméleti fókuszát jelentő tématerületek publikációs aktivitásának időbeli alakulását vizsgálom. Ezt követően a kiválasztott kutatási témák közötti kapcsolatokat a keresőkifejezések együttes előfordulását tartalmazó publikációk száma alapján, hőtérképes megjelenítéssel elemzem. Végül az eltérő publikációs volumenek figyelembevételével relatív publikációs intenzitás (RPI) mutató segítségével értékelem a tématerületek közötti együttes előfordulások arányát.

3.1.1. A kutatási terület időbeli fejlődésének elemzése

Elsőként a vizsgált témakörök publikációs aktivitásának időbeli alakulását elemeztem, amelyből az egyes kutatási irányok fejlődési ütemére lehet következtetni. A vizsgált kutatási területek 2012 és 2025 közötti alakulását a megjelent Scopus-indexelt publikációk száma alapján értékeltem. Az eredmények jelentős különbségeket mutatnak az egyes kutatási irányok publikációszámának változásában.
Az időbeli elemzésbe a disszertáció közvetlen elméleti fókuszát jelentő hat kutatási témát vontam be, az ellátási lánc, valamint a termelés és gyártás tágabb háttérterületként kizárólag a kapcsolati elemzésben szerepelt.
A legintenzívebb növekedés a digitalizáció témakörében figyelhető meg. Míg 2012-ben 1 324 publikáció jelent meg ebben a témában, addig 2025-re ez a szám elérte a 26 188-at, ami közel hússzoros növekedést jelent. A növekedés különösen 2018 után gyorsult fel, amely időben egybeesik a digitális transzformáció ipari és szolgáltatási alkalmazásainak terjedésével (1a. ábra).
Az Ipar 4.0 témakörében szintén gyors publikációszám-növekedés figyelhető meg. A 2012-ben még csupán két publikációval reprezentált téma publikációs aktivitása néhány év alatt jelentősen megnőtt és 2025-re már több mint 6 400 publikáció jelent meg évente. A növekedés különösen 2015 és 2020 között volt intenzív, ezt követően a publikációszám növekedési üteme mérséklődött (1b. ábra).
A digitális érettség témakörében az első találatok a vizsgált időszak elején jelentek meg, majd 2020 után egyre gyorsabb növekedés figyelhető meg. 2025-ben a publikációk száma több mint kétszeresére nőtt az előző évhez képest, ami a vizsgált időszak egyik legnagyobb éves változása (1c. ábra).
A Logisztika 4.0 kutatási irány publikációs aktivitása szintén növekedett a vizsgált időszakban, ugyanakkor a publikációszám lényegesen alacsonyabb maradt az Ipar 4.0 vagy a digitalizáció témájához képest. A 2022-ben elért 76 publikációt követően az éves értékek ingadoztak és egyértelmű további növekedési tendencia nem volt azonosítható (1d. ábra).
Ezzel szemben a logisztikai rugalmasság témája a teljes vizsgált időszakban alacsony és lényegében stagnáló publikációs aktivitást mutatott. Az éves publikációszám jellemzően 1 és 5 között alakult, ami arra utal, hogy az alkalmazott Scopus-keresési feltételek mellett a témakör viszonylag kevés publikációval azonosítható (1e. ábra).
A postponement kutatási irány esetében stabil, hosszú távon kiegyensúlyozott publikációs aktivitás figyelhető meg. Az éves publikációszám jellemzően 43 és 110 között változott, jelentős növekedési tendencia nélkül. Bár 2019-ben, 2021-ben és 2023-ban kisebb csúcsok figyelhetők meg, a teljes időszak alapján a postponement viszonylag állandó publikációs aktivitással jellemezhető kutatási terület (1f. ábra).

Az időbeli trendek alapján három jellegzetes csoport különíthető el. Az első csoportba a gyors publikációszám-növekedést mutató digitalizáció és Ipar 4.0 tartozik, amelyek publikációs volumene a vizsgált időszakban jelentősen megnőtt. A második csoportot a fejlődő, de még kisebb publikációs volumenű digitális érettség és Logisztika 4.0 alkotja. A harmadik csoportba a postponement és a logisztikai rugalmasság sorolható, amelyek publikációs aktivitása viszonylag stabil, ugyanakkor a két témakör publikációszáma jelentősen eltér egymástól.



1. ábra: A vizsgált kutatási témák éves publikációszámának alakulása 2012 és 2025 között

3.1.2. A kutatási témák közötti kapcsolatok hőtérképes elemzése

A kutatási témák közötti kapcsolatok vizsgálatához hőtérképes (heatmap) megjelenítést alkalmaztam, amely a Scopus adatbázisban végzett kulcsszavas keresések eredményeire épül. A hőtérkép egyes cellái a vizsgált témák együttes előfordulásának publikációszámát jelenítik meg, míg a színintenzitás a közös publikációk számának nagyságát szemlélteti. Az ábrázolási mód lehetővé teszi a gyakran együtt vizsgált tématerületek, valamint a keresési eredményekben ritkábban együtt megjelenő témák azonosítását, ezáltal segítheti a lehetséges kutatási hiányterületek feltárását. A 2. ábra a vizsgált kutatási témák közötti szakirodalmi kapcsolatok

hőtérképét mutatja be. A hőtérképen alkalmazott színkategóriák a közös publikációk számának nagyságrendi különbségeit szemléltetik. A piros szín a legalacsonyabb, a sárga a közepes, míg a zöld a legmagasabb közös publikációszámokat jelöli. A főátló szürke színű, mivel az egyes kutatási témák teljes publikációszámát mutatná, nem pedig a különböző témák együttes előfordulását.

	Ipar 4.0	Digitalizáció	Digitális érettség	Ellátási lánc	Termelés, gyártás	Logisztika 4.0	Logisztikai rugalmasság	Postpone-ment
Ipar 4.0		9220	213	4257	24128	251	0	8
Digitalizáció	9220		1145	6776	22066	143	0	3
Digitális érettség	213	1145		108	273	5	0	0
Ellátási lánc	4257	6776	108		50573	182	35	389
Termelés, gyártás	24128	22066	273	50573		133	27	498
Logisztika 4.0	251	143	5	182	133		0	0
Logisztikai rugalmasság	0	0	0	35	27	0		3
Postponement	8	3	0	389	498	0	3	

2. ábra: A vizsgált kutatási témák közötti szakirodalmi kapcsolatok hőtérképe (2026.08.05.)

A 2. ábrán bemutatott eredmények szerint az Ipar 4.0, a digitalizáció, az ellátási lánc és a termelés-gyártás tématerületei jelentős számú publikációval rendelkeznek valamint keresőkifejezéseik gyakran együtt fordulnak elő. Az Ipar 4.0 és a termelés-gyártás kapcsolatában több mint 24 ezer, míg a digitalizáció és a termelés-gyártás kapcsolatában több mint 22 ezer publikáció található. Az ellátási lánc és a termelés-gyártás együttes előfordulása még gyakoribb, meghaladja az 50 ezer publikációt. A publikációszámok alapján e témakörök között jelentős szakirodalmi átfedés azonosítható, különösen a termelési és ellátásiláncfolyamatok vizsgálatában.

A postponement stratégiát vizsgálva az ellátási lánc, valamint a termelés-gyártás témakörével való együttes előfordulások száma hasonló nagyságrendű, de a termelés-gyártás esetében magasabb. A Scopus adatbázisban 389 olyan publikáció található, amely együttesen foglalkozik a postponement és az ellátási lánc kérdéskörével, míg a termelés és gyártás vonatkozásában ez a szám 498. Ez arra utal, hogy a postponement a termelési és ellátásilánckutatásokhoz egyaránt kapcsolódik. Ezeken a területeken a stratégia alkalmazása többek között a keresleti bizonytalanság kezelését, a termékválaszték bővítését, valamint a készletezési és gyártási döntések optimalizálását szolgálhatja.

Ezzel szemben a logisztikai rugalmasság az alkalmazott keresőkifejezéssel lényegesen kisebb publikációszámmal azonosítható: a vizsgált adatbázisban 64 találat szerepelt. Az ellátási lánccal 35, a termelés-gyártás témakörével pedig 27 közös publikációt azonosítottam, amelyek száma jelentősen elmarad a többi vizsgált témakör publikációs volumenétől. A keresési eredmények alapján a logisztikai rugalmasság kifejezéshez kapcsolódó publikációk száma jóval kisebb, mint az Ipar 4.0, a digitalizáció vagy a termelési rendszerek témakörében azonosított találatoké.

A halasztási stratégia és a logisztikai rugalmasság kapcsolatát vizsgálva még alacsonyabb együttes előfordulási érték adódik. A postponement és a logisztikai rugalmasság keresőkifejezései mindössze három publikációban fordultak elő együtt a Scopus adatbázisban.

Figyelembe véve, hogy a postponementtel kapcsolatos publikációk száma meghaladja az 1 800-at, valamint hogy a témakör számos publikációban együtt jelenik meg a termelési és ellátásilánc-kutatásokkal, ez az eredmény arra utal, hogy a két vizsgált fogalom együttes tárgyalása az alkalmazott keresési feltételek mellett ritka. Ez nem zárja ki, hogy a halasztási stratégiát és a logisztikai rugalmasságot más fogalmakkal vagy eltérő terminológiával további publikációk is vizsgálják. A kapott eredmény ezért lehetséges kutatási hiányterületet jelez, amelynek pontosabb meghatározásához tartalmi szakirodalmi elemzés szükséges.
A hőtérképes elemzés alapján a halasztási (postponement) stratégia és a logisztikai rugalmasság kapcsolatának vizsgálata az alkalmazott keresőkifejezések mellett kevés publikációban jelenik meg, különösen a termelési és gyártási környezethez kapcsolódó témákhoz viszonyítva. Ez indokolja olyan modellek és módszertanok vizsgálatát, illetve kidolgozását, amelyek a postponement stratégiai alkalmazása mellett annak logisztikai rugalmasságra gyakorolt hatását is értékelik a digitálisan támogatott termelési rendszerekben. Ez a megközelítés hozzájárulhat a termelési rendszerek alkalmazkodóképességének, erőforrás-hatékonyságának és működési teljesítményének részletesebb értékeléséhez.
Bár a hőtérkép bemutatja a kutatási témák közötti együttes előfordulások abszolút publikációszámát, az egyes tématerületek jelentősen eltérő publikációs volumene miatt indokolt a kapcsolatok relatív gyakoriságának vizsgálata is. Ennek érdekében a következő alfejezet a relatív publikációs intenzitás (RPI) mutató alkalmazásával elemzi a vizsgált kutatási témák közötti kapcsolatokat.

3.1.3. Relatív publikációs intenzitás elemzése

A hőtérképes elemzés a kutatási témák közötti kapcsolatok abszolút publikációszámát mutatja be. Mivel azonban a vizsgált tématerületek publikációs volumene jelentősen eltér egymástól, az abszolút értékek önmagukban nem alkalmasak a kapcsolatok erősségének objektív összehasonlítására. Ennek kiküszöbölésére a kapcsolatok elemzését relatív publikációs intenzitás (RPI) mutató alkalmazásával egészítettem ki.
Az RPI azt fejezi ki, hogy egy adott kutatási témával foglalkozó publikációk mekkora hányada kapcsolódik egy másik vizsgált tématerülethez. A mutató normalizálja a publikációszámokat, így lehetővé teszi a különböző méretű kutatási területek közötti kapcsolatok összehasonlítását. Az RPI értéke a következő összefüggéssel határozható meg:

$$RPI_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \cdot 100\% \tag{1}$$

ahol
N_{ij} - az i-edik és j-edik kutatási téma közös publikációinak száma,
N_i - az i-edik kutatási témához tartozó összes publikáció száma.

A magasabb RPI-érték azt jelzi, hogy a kiinduló tématerület publikációinak nagyobb hányada foglalkozik a másik vizsgált témával, míg az alacsony érték arra utal, hogy a két kutatási terület csak ritkán jelenik meg ugyanazon publikációban.
A postponement témakörből kiindulva az eredmények azt mutatják, hogy a publikációk legnagyobb arányban a termelés és gyártás, valamint az ellátásilánc-menedzsment területéhez kapcsolódnak. A postponementtel foglalkozó publikációk mintegy 26,9%-ában fordul elő a termelés vagy gyártás keresőkifejezése, míg 21,0%-ukban az ellátási lánc kifejezés. Ezek az arányok megerősítik a postponement termelési és ellátásilánc-kutatásokhoz való kapcsolódását,

amelyeken belül a stratégia a készletezési és gyártási döntések alakításának egyik lehetséges eszköze.
Ezzel szemben a postponement és a logisztikai rugalmasság együttes vizsgálata rendkívül alacsony relatív intenzitást mutat. A Scopus adatbázisban az 1 851 postponementtel foglalkozó publikáció közül mindössze három tartalmazza együttesen a logisztikai rugalmasság keresőkifejezését is, amely 0,16%-os relatív publikációs intenzitásnak felel meg. Ez az arány nagyságrendekkel kisebb, mint a termelés-gyártás vagy az ellátási lánc esetében meghatározott értékek, ami arra utal, hogy a logisztikai rugalmasság megadott keresőkifejezése ritkán jelenik meg a postponementtel foglalkozó publikációkban. Az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

Téma	Közös publikáció	Összes postponement publikáció	RPI [%]
Termelés, gyártás	498	1851	26,90
Ellátási lánc	389	1851	21,02
Logisztikai rugalmasság	3	1851	0,16

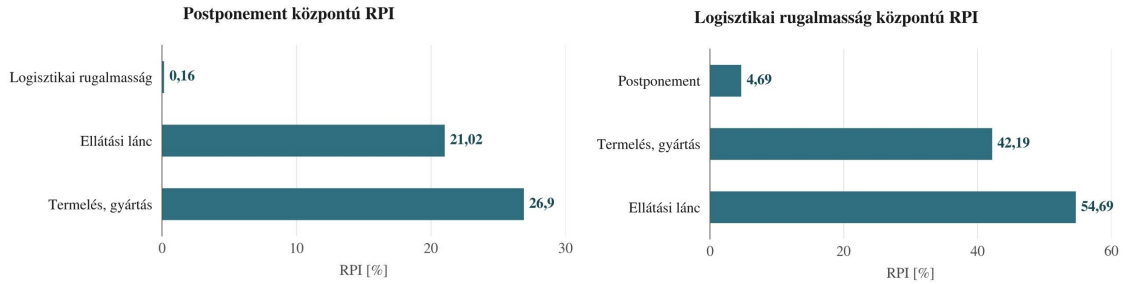
1. táblázat: A postponement és a vizsgált kutatási témák közötti relatív publikációs intenzitás (RPI)

A vizsgálat fordított irányból is alacsony együttes előfordulási arányt mutat a postponement esetében. A logisztikai rugalmassággal foglalkozó 64 publikáció közül 35 kapcsolódik az ellátási lánc kutatásához (54,7%), míg 27 a termelés és gyártás témaköréhez (42,2%). Ugyanakkor mindössze három publikáció tartalmazza együttesen a logisztikai rugalmasságot és a postponement keresőkifejezéseit, amely 4,7%-os relatív publikációs intenzitást jelent. Ez az arány azt mutatja, hogy az alkalmazott keresési feltételek mellett a postponement a logisztikai rugalmassághoz kapcsolódó publikációk kis részében jelenik meg. Az eredményeket a 2. táblázat tartalmazza.

Téma	Közös publikáció	Összes logisztikai rugalmasság publikáció	RPI [%]
Ellátási lánc	35	64	54,69
Termelés, gyártás	27	64	42,19
Postponement	3	64	4,69

2. táblázat: A logisztikai rugalmasság és a vizsgált kutatási témák közötti relatív publikációs intenzitás (RPI)

A relatív publikációs intenzitás elemzésének eredményei megerősítik a hőtérkép alapján levont következtetéseket. Míg a postponement gyakran jelenik meg együtt a termelési és az ellátásilánc-témakörökkel, addig a logisztikai rugalmassággal való együttes előfordulása mind abszolút, mind relatív értelemben alacsony. A logisztikai rugalmassággal foglalkozó publikációk között is lényegesen gyakoribb az ellátási lánc, valamint a termelés és gyártás keresőkifejezéseinek előfordulása, mint a postponementé.
A relatív publikációs intenzitás elemzése alapján a postponement és a logisztikai rugalmasság együttes előfordulása az alkalmazott Scopus-keresési feltételek mellett ritka. Bár mindkét fogalom régóta jelen van a termelési és ellátásilánc-menedzsment szakirodalmában, a két keresőkifejezés együttes megjelenése alacsony gyakoriságú. Ez további vizsgálatot indokol, különösen a digitálisan támogatott termelési és logisztikai rendszerek összefüggésében (3. ábra).



3. ábra: A postponement és a logisztikai rugalmasság kutatási témájának relatív publikációs intenzitása a vizsgált kutatási területek vonatkozásában

A tudománymetriai elemzés eredményei arra utalnak, hogy a postponement és a logisztikai rugalmasság együttes vizsgálata az alkalmazott Scopus-keresési feltételek mellett korlátozottan jelenik meg a szakirodalomban. A két tématerület között mindössze három közös publikáció került azonosításra. A tudománymetriai eredmények ezért indokolják a két tématerület, valamint azok digitalizációval és az Ipar 4.0-val fennálló kapcsolatainak részletes szakirodalmi vizsgálatát. A kutatási hiány pontos meghatározására a fejezet további szakirodalmi elemzése és szintézise alapján kerül sor.

3.2. A kutatási területhez kapcsolódó szakirodalom elemzése

A szakirodalmi elemzés elméleti alapot ad a kutatáshoz. Ennek keretében bemutatom a keresleti bizonytalanságot, az Ipar 4.0 és a Logisztika 4.0 fogalmi keretrendszerét, a digitális transzformáció és a vállalati digitális érettség főbb megközelítéseit, valamint áttekintem a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia szakirodalmát.

A termelési és logisztikai rendszerek digitalizációjának gyakorlati jelentősége különösen akkor mutatkozik meg, amikor a vállalatnak a korábban tervezettől eltérő keresletet kell kiszolgálnia. Ilyen helyzetben nem elegendő a rendelésváltozás gyors felismerése: a készleteket, a termelési feladatokat és az anyagellátást is össze kell hangolni. Az értekezés központi kérdése ezért az, hogy az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó digitális képességek milyen mechanizmusokon keresztül és milyen feltételek mellett támogathatják a logisztikai rugalmasságot nagy keresleti bizonytalanság esetén.

A 3.1. fejezet tudománymetriai elemzését kiegészítő áttekintés e kérdés mentén kapcsolja össze a különböző kutatási irányokat. Kiindulópontja a bizonytalanságból eredő információigény. Ezt a digitális technológiák és a vállalati fejlettség értelmezése, majd a rugalmasság és a halasztási stratégia vizsgálata követi. A megvalósítás feltételeinek és a döntési modelleknek az értékelése a későbbi empirikus és operatív vizsgálatokhoz ad elméleti alapot. A feldolgozás tematikus, kritikai szintézis: az egyes eredmények összevetésekor figyelembe veszi, hogy azok elméleti modellekből, vállalati felmérésekből vagy esettanulmányokból származnak.

3.2.1. Keresleti bizonytalanság és az információ döntési értéke

A keresleti bizonytalanság a jövőbeni igények mennyiségére, összetételére és időzítésére vonatkozó ismeretek korlátozottságát jelenti egy adott döntési időpontban. Nem azonos a kereslet változékonyságával: egy erős szezonális ingadozás jól előre jelezhető lehet, miközben viszonylag állandó összkereslet mellett a termékváltozatok aránya bizonytalan maradhat. A fogalom értelmezéséhez ezért meg kell határozni a vizsgált termékszintet és a tervezési időhorizontot. A termékcsalád éves keresletének becslése más döntést támogat, mint a következő műszakban teljesítendő rendelések változatszintű ismerete.

A bizonytalanság működési hatása akkor jelentkezik, amikor az előzetes erőforrás-lekötés eltér a tényleges igényektől. A túlbecsült kereslet készlettöbbletet és kihasználatlan kapacitást, az alulbecsült kereslet hiányt, késedelmet vagy rendkívüli ráfordítást okozhat. A termékmix változásakor az összmennyiség teljesülése is elfedhet ellátási problémát: az egyik változat készlete nem feltétlenül helyettesíti a másikhoz szükséges alkatrészt. A készletezési modellek ezért a készlettartás és a kielégítetlen igény költségét együttesen kezelik, a konkrét üzemi alkalmazásban ehhez társulnak az átütemezés és a sürgős anyagellátás következményei [P7].
A terhelés időbeli eloszlása szintén befolyásolja a kiszolgálási képességet. Egy műszak összesített kapacitása elegendő lehet, miközben a feladatok rövid időszakra történő koncentrálódása torlódást okoz. Kingman várakozáselméleti eredménye a nagy terheléső rendszerek érzékenységére mutat rá: meghatározott feltételek mellett a várakozás meredeken emelkedik, amikor a kihasználtság a kapacitáshatárhoz közelít [P8]. Egy teljes üzemi rendszerre ez nem jelent közvetlen számszerű előrejelzést, de indokolja a komissiózás, a belső szállítás és a végső műveletek időbeli összehangolását. Az átlagos darabszám önmagában nem írja le a kiszolgálás nehézségét.
Az ellátási láncban a keresleti bizonytalanságot a rendelési döntésekből származó torzítás is kiegészítheti. Az ostorcsapás-effektus során a rendelési mennyiségek ingadozása az ellátási lánc beszállítói irányába felerősödhet. Ennek ismert magyarázatai közé tartozik a keresleti jelzések feldolgozása, a rendelési tételek összevonása, az áringadozás és a hiányhelyzethez kapcsolódó rendelési magatartás [P5]. A digitalizáció szerepe itt a végső igény és a közvetítő döntések hatásának elkülönítésében is megjelenhet. Az adatok megosztása azonban csak az alkalmazott rendelési és készletezési szabályokkal együtt értékelhető.
A bizonytalanság és a szervezeti működés kapcsolatát az információfeldolgozási megközelítés foglalja elméleti keretbe. A kevésbé előre meghatározható feladatok több információfeldolgozást és egyeztetést igényelnek. Ezt a szervezet az információigény csökkentésével vagy feldolgozási képességének bővítésével kezelheti [P9]. A logisztikában az első megoldást például készlet- vagy kapacitástartalék, a másodikat jobb adatkapcsolat és összehangolt döntési rend képviselheti. A digitális fejlesztés az alkalmazkodás egyik eszköze, amelyet a többi lehetséges beavatkozással együtt kell értékelni.
Az információ értékét a támogatott döntés eredményéből lehet levezetni. Döntéselméleti értelemben a többletinformáció bruttó értéke az információval és az anélkül elérhető legjobb várható eredmény különbsége, de a nettó előnyt az információ megszerzésének és felhasználásának költsége csökkenti [P10]. Az összehasonlítás azonos célokat és erőforrásfeltételeket feltételez. A nagyobb bizonytalanság növelheti egy téves döntés következményeit, de az információ értéke nem szükségszerűen nő vele együtt. Ha az adat túl későn érkezik, vagy a rendelkezésre álló lehetőségek mellett nem változtatja meg a célszerű döntést, operatív haszna korlátozott marad. Az információmegosztás szakirodalma e feltételességet közvetlenül is szemlélteti.
Egy kétszintű ellátásilánc-modellben a keresleti adatok megosztása jelentős előnyt eredményezhet [P6], ugyanakkor a teljes rendelési előzmény megfelelő felhasználásával a közvetlen keresleti adat többlethaszna az adott modellfeltételek mellett lényegesen kisebb lehet [P11]. Egy másik modellvizsgálatban az átfutási idő és a tételnagyság csökkentése nagyobb költségelőnyt hozott, mint az információmegosztás önmagában [P7]. Az eredmények alapján az információ haszna a már rendelkezésre álló tudástól és a módosítható folyamatoktól is függ. A vizsgálat tárgya ezért az adatból a végrehajtható döntésig vezető kapcsolat.

3.2.2. Az Ipar 4.0 és a Logisztika 4.0 működési képességei

Az Ipar 4.0 technológiai és szervezési keretet adhat az információ és a végrehajtás összekapcsolásához. A szakirodalomban a fogalom lehatárolása nem egységes: az intelligens gyártással és a digitális transzformációval részben átfedő meghatározások az empirikus eredmények összehasonlítását is nehezítik [P12]. Az értekezésben az Ipar 4.0 a fizikai termelési és logisztikai folyamatokat, a digitális információfeldolgozást és a visszacsatolt irányítást összekapcsoló működési keretet jelenti. E meghatározás a konkrét alkalmazásban vizsgálható kapcsolatokat helyezi előtérbe: mely folyamatállapotok válnak megfigyelhetővé, mely döntések javulhatnak, és hogyan valósul meg a beavatkozás.

A kiberfizikai termelési rendszerekben a fizikai állapot érzékelése számítási, kommunikációs és beavatkozási funkciókkal kapcsolódik össze [P13]. Egy berendezés vagy anyagmozgatási folyamat digitalizálása ezért különböző mélységű lehet. Az esemény elektronikus rögzítése önmagában a megfigyelhetőséget támogatja, az integrált működéshez az adatnak el kell jutnia az azt felhasználó döntési szintre, majd a döntés eredményének vissza kell kapcsolódnia a folyamathoz. A visszacsatolás kapcsolhatja össze a helyi automatizálást a vállalati alkalmazkodóképességgel. A helyben gyorsabb művelet akkor javítja a rendszerszintű teljesítést, ha nem növeli más folyamat terhelését kezelhetetlen mértékben.

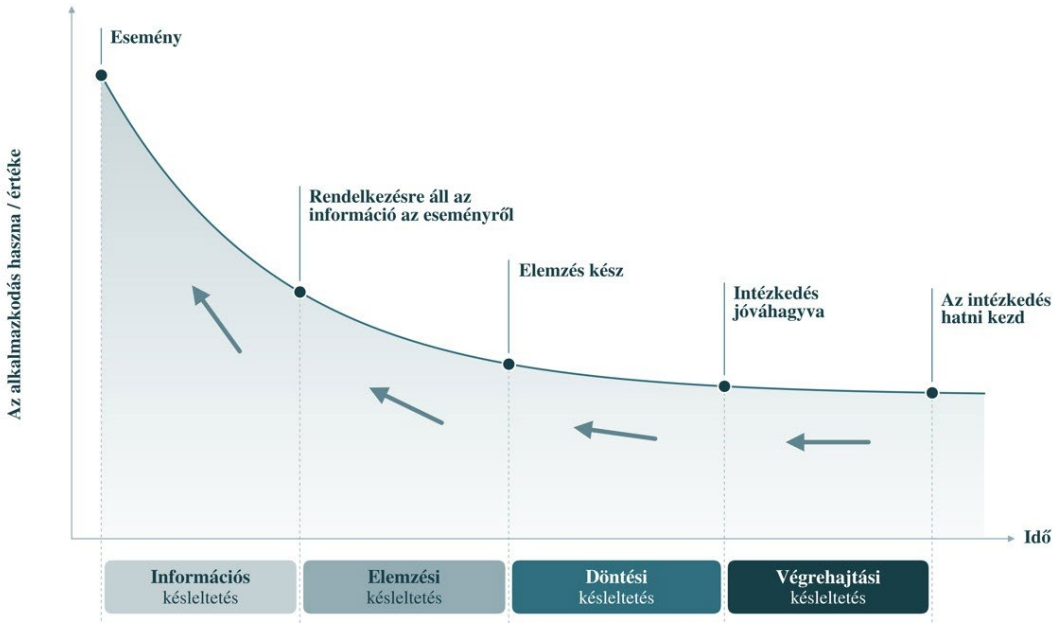
A technológiák szerepét célszerű az általuk támogatott funkciók szerint értelmezni. A dolgok internete (Internet of Things, IoT), az adatfeldolgozás és a felhőalapú megoldások alapot adhatnak a gyártási, ellátásiláns- és munkavégzési alkalmazásokhoz, bár e technológiák vállalati bevezetése eltérő mintázatokat követ [P14]. A hálózati adatgyűjtés a megfigyelhetőséget, a rendszerintegráció az információ összehangolását, az elemzés a döntés előkészítését, a digitális utasítás és visszaigazolás pedig a végrehajtás követését támogatja. Egy adott logisztikai célhoz e funkciók megfelelő együttműködése szükséges, ezért a bevezetett technológiák száma önmagában nem jellemzi megfelelően a kialakult működési képességet.

Az acatech megközelítése az Ipar 4.0 alkalmazkodást támogató szerepét az esemény bekövetkezése és a válaszintézkedés tényleges hatása közötti idő csökkentésével magyarázza. A folyamatban felismerési, elemzési, döntési és végrehajtási késedelmet különít el. E felbontás az alkalmazkodás időbeli összetevőit szemlélteti (4. ábra) [P1].

A 4. ábra vízszintes tengelye az esemény óta eltelt időt, függőleges tengelye az alkalmazkodás lehetséges értékét jelöli. A csökkenő görbe azt szemlélteti, hogy a reagálás késlekedésével mérséklődhet az alkalmazkodás értéke, a zöld nyilak pedig a késedelmek rövidítésének irányát mutatják. Az összefüggés sematikus: a görbéből konkrét időértékek vagy teljesítményjavulási arányok nem vezethetők le.

A felismerési vagy információs késedelem az esemény bekövetkezésétől a róla szóló információ rendelkezésre állásáig tart. A vizsgált logisztikai működésben ilyen esemény lehet egy rendelésmódosítás, anyaghiány vagy erőforrás-kiesés. Ha például egy készleteltérés csak a komissiózás megkezdésekor válik ismertté, a tervezés addig a korábbi készletadatokra épülhet. Az események digitális rögzítése és az érintett rendszerek közötti adatátadás ezt az időszakot rövidítheti. Ehhez azonban a jelzésnek a döntésért felelős személyhez vagy funkcióhoz is el kell jutnia.

Az elemzési késedelem az információ rendelkezésre állásától az elemzés befejezéséig terjed. Egy anyaghiány felismerését követően például meg kell határozni, hogy mely rendelések érintettek, milyen készletek használhatók fel, és lehetséges-e más végrehajtási sorrend.



4. ábra: A vállalati alkalmazkodás késedelmei és az alkalmazkodás értéke. (Forrás: [P1], 11. o., 1. ábra.)

A vizsgált logisztikai rendszerben ehhez a rendelési, készlet-, kapacitás- és végrehajtási adatok együttes értékelése szükséges. A különálló nyilvántartásokból végzett kézi adatgyűjtés meghosszabbíthatja az elemzést, míg az összekapcsolt adatokra épülő döntéstámogatás gyorsíthatja az alternatívák összehasonlítását.

A döntési késedelem az elemzés lezárása és az intézkedés jóváhagyása közötti idő. Egy megvalósítható új ütemezés elkészülte után is szükség lehet a termelési és logisztikai prioritások egyeztetésére. A vizsgált rendszerben ezért fontos a döntési jogosultságok, a jóváhagyási folyamat és az eltéréskezelési felelősségek egyértelmű meghatározása. Ha például az alternatívák gyorsan előállnak, de kiválasztásuk több, egymást követő egyeztetést igényel, az elemzési idő csökkenése csak korlátozottan rövidíti a teljes reagálási időt.

A végrehajtási késedelem a jóváhagyott intézkedéstől annak tényleges hatásáig tart. A logisztikai folyamatban az új prioritás közlése után még szükség lehet az anyagok előkészítésére, a szállítás megszervezésére vagy a munkaállomás átállítására. Az intézkedés hatásának időpontját ezért a vizsgált feladathoz kell kötni: például az anyag munkahelyre érkezéséhez vagy a módosított rendelés feldolgozásának megkezdéséhez. A digitális utasítás gyors továbbítása mellett a fizikai erőforrások rendelkezésre állása is meghatározza, mikor jelentkezik az intézkedés hatása.

A megközelítés az értekezésben azért hasznos, mert a digitalizáció és a logisztikai rugalmasság kapcsolatát elkülöníthető működési összetevőkre bontja. Egy fejlesztés így aszerint is értékelhető, hogy melyik késedelmet mérsékelheti és hatása hogyan jelenik meg a fizikai végrehajtásban. A készletadatok gyakoribb frissítése elsősorban a felismerést segítheti, az aktuális erőforrásadatokra épülő újratervezés az elemzést támogathatja, a rendezett döntési jogosultság pedig a jóváhagyás időigényét csökkentheti. Az egyes fejlesztések hatásának értékeléséhez ezért a részidők mellett a teljes reagálási időt is vizsgálni kell.

Az acatech a technológiai képességek mellett a szervezeti struktúra és kultúra jelentőségét is hangsúlyozza [P1]. A vizsgált logisztikai rendszerben ennek jelentősége az adatminőség, a felelősségi körök és a végrehajtási feltételek összehangolásában mutatkozik meg. A gyorsabb döntés akkor támogathatja az alkalmazkodást, ha megfelelő információra épül, és a kiválasztott

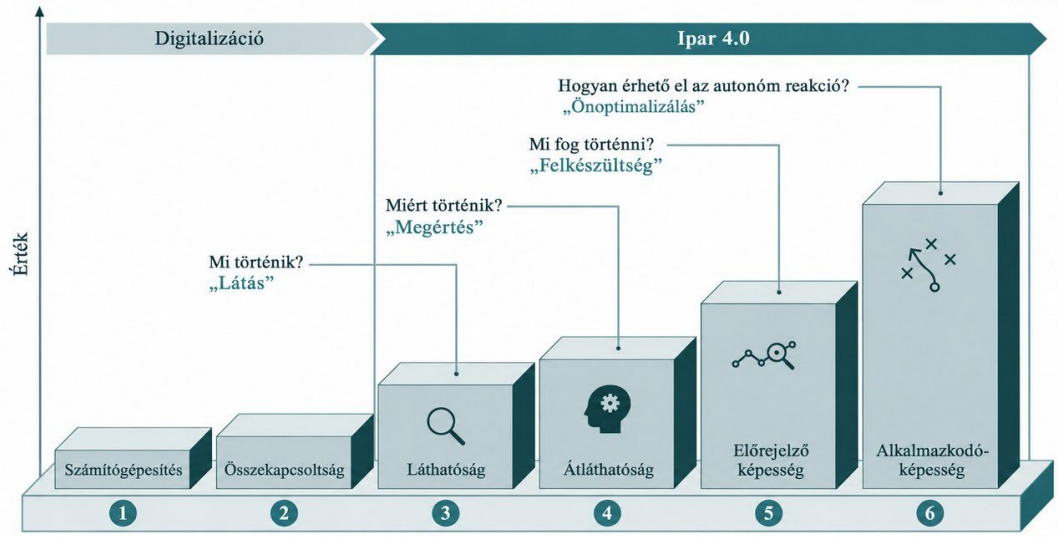
intézkedés megvalósítható. Az alkalmazkodás eredményét ezért a határidőre történő teljesítéssel, az erőforrás-felhasználással és a folyamat más részeire gyakorolt hatással együtt szükséges értékelni.

A postponement stratégia alkalmazásakor külön jelentősége van a tudatos halasztás és a működési késedelmek megkülönböztetésének. A termékváltozatra vonatkozó döntés későbbre helyezése pontosabb keresleti információ felhasználását szolgálja. A már rendelkezésre álló információ feldolgozásában, a jóváhagyásban és a végrehajtásban jelentkező késedelem ugyanakkor a teljesítésre fordítható időt csökkenti. E késedelmek mérséklése lehetőséget adhat a termékváltozat későbbi meghatározására a vállalt határidő megtartása mellett. Ennek feltétele, hogy a szükséges anyagok, munkaerő és eszközök is rendelkezésre álljanak. A 4. ábra így elméleti támpontot ad a 9.1. fejezetben bemutatott digitalizált postponement rendszer visszacsatolt működésének és időbeli korlátainak értelmezéséhez.

A Logisztika 4.0 ezt a szemléletet az anyagáramlásra és a kapcsolódó információs folyamatokra alkalmazza. A fogalom a technikai eszközök mellett a logisztikai feladatokat, az emberi tényezőket és a működési környezetet is magában foglalja [P15]. Telephelyi szinten a készletek, a komissiózás, a szállítás és a termelésellátás összehangolása kerül előtérbe, ehhez kapcsolódik az ellátási lánc szintjén a különböző szervezetek közötti koordináció. A két elemzési szint összefügg, de nem helyettesíti egymást: a beszállítói információ elérhetősége önmagában nem biztosítja a belső anyagellátás megfelelő működését.

Az intralogisztikában az azonosítás és az eseményrögzítés teszi követhetővé az anyag helyét és állapotát. A vállalati erőforrás-tervezési rendszer (ERP), a termelésvégrehajtási rendszer (MES) és a raktárirányítási rendszer (WMS) összekapcsolása révén a rendelési igény együtt értékelhető a készlet és a végrehajtás adataival. Az IoT-alapú termeléslogisztikai szinkronizáció kutatása ilyen, egymásra épülő irányítási feladatokat vizsgál [P16]. A rendszerintegráció révén megkülönböztethető a fizikailag jelen lévő, a rendeléshez már lefoglalt és a ténylegesen felhasználható készlet. E különbség nélkül a gyors adatátadás is hibás anyagellátási döntést támogathat.

A láthatóság, az összefüggések megértése és a beavatkozás egymástól elkülönítendő képesség. Az acatech érettségi kerete a számítógépesítéstől és az összekapcsolhatóságtól a láthatóságon és az átláthatóságon át az előrejelző képességig, majd az alkalmazkodóképességig különböztet meg fejlődési szinteket (5. ábra).



5. ábra: Az acatech Ipar 4.0 érettségi index [P17]

A végrehajtás digitalizációja emberi munkavégzés mellett is megvalósulhat. A papírmentes munkautasítás akkor hordoz többletképességet, ha a prioritás módosítható, a teljesítés visszaigazolható és az eltérés kezelése meghatározott felelőshöz kerül.
Például megváltozott csomagolási igény esetén össze kell hangolni az új anyagjegyzéket, a komissiózást és a munkaállomás ellátását. A gyorsabb jelzés a felismerési késedelmet csökkenti, a feladat határidős teljesítését azonban az anyag, az ember és a szállítóeszköz rendelkezésre állása együtt határozza meg. A technológiai támogatás hatását ezért a vállalati folyamatokba való beépülésével együtt kell értékelni. Az információs folyamatok automatizálását korábbi tanulmányomban az RPA alkalmazásain keresztül is vizsgáltam. A rendelési adatok továbbítása, a készletszintek ellenőrzése és az ismétlődő adatbeviteli feladatok automatizálása olyan támogatási lehetőségként jelent meg, amely a fizikai anyagmozgatás automatizálása mellett a beszerzési és igénykezelési rugalmassághoz is kapcsolódhat [S6]. De összességében elmondható, hogy a Logisztika 4.0 megoldásainak rugalmasságot támogató szerepét korábbi elméleti áttekintésemben is vizsgáltam, ebben a folyamatok megfigyelése, az automatizálás és az adatokra épülő beavatkozás lehetőségei kerültek előtérbe [S4]. A logisztikai rugalmasság növelése ezért a Logisztika 4.0 egyik vizsgálható működési eredménye. Ennek fogalmi és elméleti hátterét a 3.2.4. alfejezet mutatja be.

3.2.3. Digitális transzformáció és a vállalati digitális fejlettség értékelése

A vállalati digitális fejlődés értékeléséhez az Ipar 4.0 technológiai kerete mellett a referenciaarchitektúrákat és a digitális érettségi modelleket is vizsgálni kell. A referenciaarchitektúrák az Ipar 4.0 rendszerek szerkezeti felépítését írják le, míg a digitális érettségi modellek a vállalatok digitalizációs fejlettségének értékelésére szolgálnak. A két megközelítés eltérő szempontokkal támogatja a digitális működés értelmezését és empirikus értékelését.
Az adatok digitális formára alakítása, a folyamatok digitális támogatása és a digitális transzformáció eltérő változást jelent. A transzformáció a technológiák alkalmazásával összefüggő, az értékteremtést és a szervezeti működést is érintő átalakulás, míg az adatbevitel elektronizálása ennek egyik lehetséges előfeltétele [P18]. A logisztikai értelmezésben a lényegi változás például akkor következik be, amikor a szervezet a friss állapotadatok alapján új döntési rendet alakít ki. Ehhez a rendszerkapcsolatok mellett az együttműködés, a kompetenciák és a felelősségek módosítása is szükséges lehet.
A digitális felkészültség a fejlesztéshez rendelkezésre álló adottságokat, a digitális érettség pedig a képességek megvalósulását és szervezeti beágyazottságát írhatja le. Az elnevezések használata nem minden modellben azonos, a mérés tartalmát ezért az értékelt dimenziók teszik egyértelművé. A gyártóvállalati érettségi modellekben a stratégia, a vezetés, az emberek, a kultúra és a technológia együttes értékelése jelenik meg [P19]. A kis- és középvállalatokra irányuló kritikai áttekintés ugyanakkor jelzi, hogy az általános modellek követelményei nem feltétlenül illeszkednek minden szervezet erőforrásaihoz és kiinduló helyzetéhez [P20].
A modellek különböző értékelési célokat szolgálnak. A dimenziók szerint felépített értékelés a fejlesztési profil különbségeit mutatja meg, a fejlődési szinteket alkalmazó keret pedig a képességek egymásra épülését hangsúlyozza. Az acatech Ipar 4.0 érettségi modelljében az erőforrások, az információs rendszerek, a szervezeti struktúra és a kultúra egyaránt önálló értékelési terület [P21]. A vállalat számára releváns célszintet azonban a működési feladat indokolja. Egy egyszerű, megbízható adatkapcsolat hasznosabb lehet egy adott ellátási

problémában, mint egy összetett alkalmazás, amelynek eredményét a munkafolyamat nem használja fel.

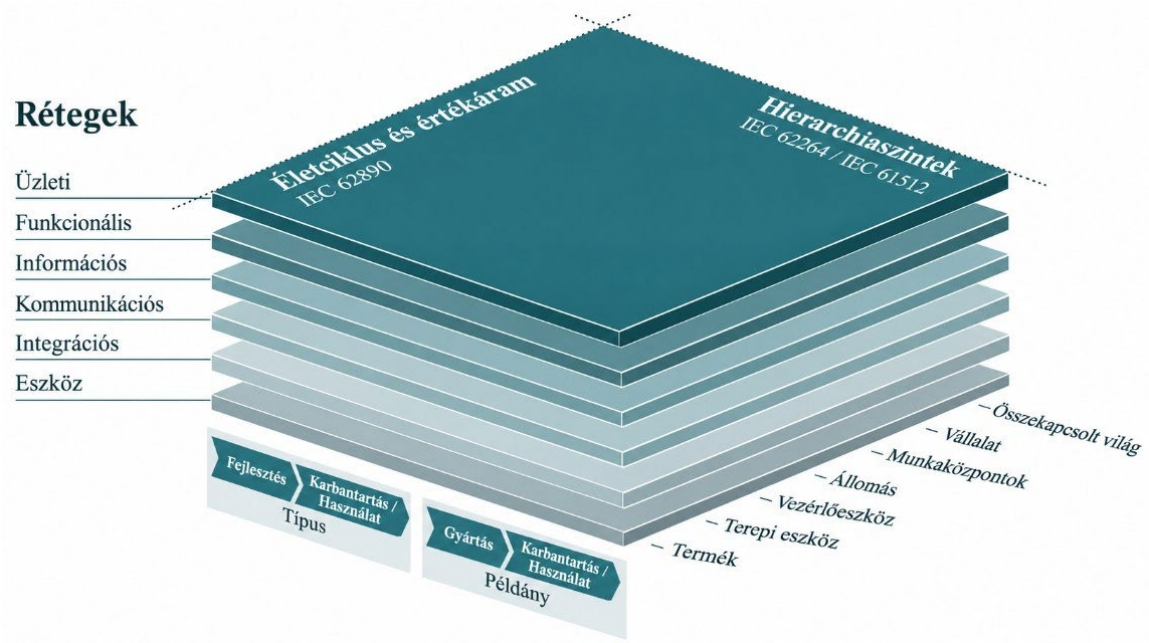
A fejlettség vizsgálatában három szempontot célszerű megkülönböztetni: a technológia jelenlétét, használatának módját és az elért működési eredményt. A rendszer meglétére adott válasz nem mutatja meg az integráció mélységét vagy a folyamat lefedettségét. A technológia fontosságának megítélése pedig véleményt mér, amely nem azonos a megvalósítás állapotával. Azonos vállalati összpontszám mögött ezért különböző képességprofil állhat. Ez különösen lényeges, amikor a digitális fejlettséget a rugalmassággal vetjük össze: egy fejlett adatelemzési terület és egy hiányos végrehajtási kapcsolat együtt is magas részpontszámokat eredményezhet, miközben az anyagellátás reakciója korlátozott marad.

Az összetett mutató kialakítása elméleti és módszertani döntéseket igényel. A változók kiválasztása, a normalizálás, a súlyozás és az aggregálás határozza meg, milyen tartalmú különbséget fejez ki az index. A módszertani szakirodalom a keret indoklását és az eredmények érzékenységének vizsgálatát egyaránt szükségesnek tartja [P22]. Súlyozott összegzésnél külön kérdés, hogy az egyik terület kedvező értéke milyen mértékben ellensúlyozhatja egy másik hiányát. Egy kritikus adatkapcsolat hiánya például a működésben nem feltétlenül kompenzálható több, más célra használt digitális eszközzel.

Az értekezés Digitális Fejlettségi Indexe (DFI), amelyet a kapcsolódó közleményemben Digitalization Development Index (DDI) néven is bemutattam [S2], ebben a keretben a saját vállalati adatfelvételhez illesztett összehasonlító mutatóként értelmezhető. Nem feleltethető meg automatikusan egy általános érettségi modell fokozatának, és nem helyettesíti az egyes logisztikai folyamatok mérését. A rugalmassággal fennálló kapcsolat értékelésekor az index és az eredményváltozók tartalmi átfedését is vizsgálni kell. A DFI ezért a digitális működés vállalati hátterét jellemzi, míg a következő kérdés az, hogy ez a háttér milyen konkrét változtatásokat tesz lehetővé a logisztikában.

Az Ipar 4.0-rendszerek értelmezése az egyes technológiák mellett azok kapcsolódásának vizsgálatát is igényli. A referenciaarchitektúrák és az érettségi modellek segítenek megérteni, hogy a technológiai, információs, szervezeti és üzleti elemek hogyan kapcsolódnak össze egységes rendszerré.

Az ipari digitalizáció egyik referenciaarchitektúrája a RAMI 4.0 modell [P23], amely az Ipar 4.0 rendszereket többdimenziós struktúrában értelmezi (6. ábra). A modell lényege, hogy az ipari rendszereket nemcsak fizikai hierarchiaszintek szerint kell vizsgálni, hanem figyelembe kell venni az életciklus- és értékáram-szemléletet, valamint az üzleti, funkcionális, információs, kommunikációs és technológiai rétegeket is. A modell az elszigetelt digitalizációs projektek helyett az ipari rendszerek architekturális összefüggéseinek vizsgálatát segíti.



6. ábra: A RAMI 4.0 referenciamodell felépítése [P23]

A RAMI 4.0 referenciamodell az ipari rendszereket három tengely mentén írja le: az életciklus és értékáram, a hierarchiaszintek, valamint az architekturális rétegek szerint. Hat rétege alulról felfelé az eszközréteg (Asset), az integrációs, a kommunikációs, az információs, a funkcionális és az üzleti réteg. A modell az ipari rendszerek elemeinek és kapcsolatainak rendezett leírását támogatja. A logisztikai rendszerek szempontjából a RAMI 4.0 szemlélete hasznos, mert az anyagáramlás és információáramlás több szinten kapcsolódik össze. Egy intralogisztikai folyamat esetében a fizikai objektum lehet egy alkatrész, raklap, láda, targonca vagy autonóm mobil robot. Ezekhez kapcsolódnak az azonosítási és szenzoradatok, a kommunikációs protokollok, a WMS- vagy MES-rendszerben tárolt információk, valamint az üzleti döntési szabályok. A referenciaarchitektúra alapján a logisztikai teljesítmény értékelésekor az eszközök képességei mellett az adatok szerkezetét, minőségét és döntési folyamatokba való beépülését is vizsgálni lehet.

Bár a referenciaarchitektúrák részletesen bemutatják az Ipar 4.0 rendszerek felépítését és működését, önmagukban nem alkalmasak annak megítélésére, hogy egy vállalat milyen szinten valósította meg a digitális transzformációt. A megvalósult képességek szintjének értékelésére a digitális érettségi modellek alkalmasak.

A digitális transzformáció a technológiai fejlesztésekhez kapcsolódóan a vállalati működés és a szervezet változását is magában foglalja. A vállalati digitális érettség többdimenziós fogalom, amely technológiai, szervezeti és humán tényezőket egyaránt magában foglal. Ez indokolja olyan összetett mutatószám alkalmazását, amely képes ezen dimenziók együttes értékelésére.

3.2.4. A logisztikai rugalmasság tartalma és értékelése

A logisztikai rugalmasság a működés eltérő igényekhez történő igazításának képessége, elfogadható idő-, költség- és teljesítménykövetkezmények mellett. A fogalomnak nincs minden vizsgálatban egységes értelmezése, a szakirodalmi áttekintések különböző elemzési szinteket és mérési megoldásokat azonosítanak [P24]. A rugalmasság ezért csak a változás tárgyának, a rendszerhatárnak és az értékelés időtávjának megadásával vizsgálható. Egy munkaállomás

gyors átállíthatósága nem jelenti automatikusan a teljes anyagellátási rendszer rugalmasságát, ha a kapcsolódó készlet vagy szállítási kapacitás nem áll rendelkezésre.
A rugalmas működés nem azonos a magas kapacitással. Egy nagy áteresztőképességű rendszer szűk termékkörre és rögzített sorrendre is korlátozódhat, míg egy kisebb rendszer többféle igényhez alkalmazkodhat. A rugalmasság értelmezésében ezért a megvalósítható állapotok köre mellett a közöttük történő váltás ráfordítása is számít [P25]. A reagálóképesség az időben végrehajtott válaszra, az agilitás a változó környezethez történő szélesebb szervezeti alkalmazkodásra helyezi a hangsúlyt [P26]. Az ellenállóképesség pedig a zavarokkal szembeni működőképesség és helyreállás kérdését emeli ki [P27]. A rugalmasság e képességeket támogathatja, de önmagában nem azonos velük.
A dolgozat empirikus vizsgálatában alkalmazott öt dimenzió a változtatások különböző területeit írja le. A volumen a kezelhető mennyiséghez, a termékmix az egyidejűleg kiszolgálható változatokhoz, a szállítás a teljesítési megoldásokhoz, az időbeliség az ütemezés módosíthatóságához, az útvonal pedig az anyagáramlás alternatíváihoz kapcsolódik. Az alábbi táblázat e felbontást a működési értékelés lehetséges kérdéseivel kapcsolja össze (3. táblázat). A példák a dimenziók működési értelmezését segítik.

Dimenzió	**A változtatás tárgya**	**Az értékelés lehetséges kérdése**
Volumenrugalmasság	A kezelhető rendelési vagy anyagmozgatási mennyiség.	Mekkora mennyiségi eltérés teljesíthető az adott határidő és erőforrások mellett?
Termékmix-rugalmasság	A termékváltozatok köre és aránya.	Milyen összetétel-változás kezelhető, és hogyan alakul az átállás vagy az anyagellátás igénye?
Szállítási rugalmasság	A kiszolgálás módja és szervezése.	Milyen alternatív teljesítési megoldás érhető el, mekkora idő- és költségtöbblettel?
Időbeli rugalmasság	A feladatok ütemezése és a teljesítés időpontja.	Mennyivel és milyen feltételekkel módosítható a sorrend vagy a teljesítési idő?
Útvonal-rugalmasság	Az anyagáramlás útvonala és kiszolgálási kapcsolatai.	Milyen alternatív út használható a fennálló hozzáférési és kapacitáskorlátok mellett?

3. táblázat: A logisztikai rugalmasság dimenzióinak működési értelmezése (Forrás: saját szerkesztés az értekezés vizsgálati dimenziói és a fogalmi áttekintés [P24] alapján)

A táblázatban elkülönített dimenziók a vállalati működésben kölcsönösen befolyásolhatják egymást. A termékmix módosulása azonos darabszám mellett is növelheti a komissiózási vagy konfigurálási időt, így szűkítheti a teljesíthető volument. Az alternatív útvonal pedig csak akkor bővíti a választlehetőségeket, ha használatához megfelelő eszköz és hozzáférés áll rendelkezésre. A rugalmasság értékelése ezért több mutató együttes vizsgálatát igényli: milyen változást tud a rendszer kezelni, mennyi idő alatt, milyen többletráfordítással és milyen kiszolgálási szint mellett. A magasabb érték egyik dimenzióban nem szükségszerűen jár együtt minden másik kedvező változásával [P24, P25].
A digitalizáció e képességet az információs és koordinációs késedelem mérséklésével támogathatja. Az informatikai integráció, a rugalmas folyamatok és az agilitás kapcsolatát vizsgáló kutatás az egymásra épülő képességeket elemzi [P28]. Egy újabb, 379 termelővállalatra kiterjedő felmérésben a digitálisan támogatott ellátási lánc a rugalmassági dimenziókon keresztül mutatott statisztikai kapcsolatot a működési teljesítménnyel, az

összefüggések a vevői és beszállítói bizonytalanság szerint is eltértek [P29]. Eredményeik indokolják a közvetítő mechanizmusok vizsgálatát, de nem teszik általánosíthatóvá, hogy minden digitális beruházás azonos mértékű rugalmasságnövekedést okoz. Saját korábbi elméleti tanulmányomban a valós idejű folyamatmegfigyelés és a prediktív elemzés lehetséges hatásait külön tárgyaltam. A megfigyelésnél a gyorsabb állapotfelismerés és beavatkozás, a prediktív elemzésnél a kereslet, a zavarok és az erőforrásigény előzetes értékelése került előtérbe [S7]. A tanulmány e mechanizmusokat rendszerezte, vállalati mintán becsült hatásnagyságot nem közölt.
A kérdőíves és a működési értékelés eltérő, egymást kiegészítő információt ad. A vállalati önértékelés több szervezet összevetését teszi lehetővé, míg az eseményadatok, az átfutási idők és a kapacitáskorlátok egy konkrét folyamat tényleges válaszát írják le. Az értekezésben e két elemzési szintet külön kell kezelni. A digitális fejlettség és az észlelt rugalmasság korrelációja vállalati összefüggést jelez. A halasztási stratégia olyan működési területet kínál, ahol a két nézőpont közötti kapcsolat részletesen vizsgálható.

3.2.5. A postponement mint a bizonytalanság kezelésének stratégiája

A halasztási (postponement) stratégia egyes tevékenységek végrehajtását későbbre helyezi, hogy végrehajtásuk pontosabb keresleti vagy rendelési információra épülhessen. A szakirodalom több megvalósítási formát különböztet meg, ezek között a termék kialakításának és a fizikai elosztásnak a késleltetése is megjelenik [P30]. Az értekezés fókuszában a késleltetett termékdifferenciálás áll: egy közös termékalap előállítása után a vevőspecifikus végszerelés, konfigurálás vagy csomagolás későbbi információhoz igazodik. A stratégia így későbbre tolja egyes, keresleti bizonytalanságnak kitett döntések időpontját, és megváltoztathatja a készlet összetételét.
A mechanizmus a közös és a változatspecifikus tevékenységek elválasztásán alapul. Ha a végtermékeket teljeskörűen és előre elkészítik, a készlet már meghatározott változatokhoz kötődik. Közös félkész termék esetén később választható meg, hogy a rendelkezésre álló mennyiségből milyen végtermék készüljön. A több változathoz felhasználható félkész termékek modelljei megmutatják, hogy a kereslet szórása és korrelációja, a termékstruktúra és a befejező kapacitás együtt befolyásolja az előnyös készletezést [P31]. A közös készlet kedvező hatása ezért nem kizárólag a változatok számától, hanem attól is függ, mennyire helyettesíthetők egymással a készlet lehetséges felhasználásai.
A halasztás előnye együtt jár a rendelés utáni végrehajtás követelményével. Minél később történik a változatspecifikus döntés, annál több információ állhat rendelkezésre, ugyanakkor annál rövidebb idő maradhat a hátralévő műveletekre. A termékcsalád teljes szükséglete, a közös alkatrészek utánpótlása és a kapacitások lekötése továbbra is előzetes tervezést igényelhet. A stratégia így átrendezi a bizonytalanság következményeit: a késztermék összetételéhez kötődő kockázat csökkenhet, miközben a végső műveletek és az anyagellátás időbeli terhelése meghatározóbbá válik. Ezért a készletkockázat és a végrehajtási korlátok együttes értékelése szükséges.
Nem minden termék vagy rendelés esetén célszerű azonos mértékű halasztást alkalmazni. A részleges postponement modellje lehetővé teszi a késztermékkészlet és a rendelés után befejezendő termék együttes kezelését, a döntést a készletezési, hiány- és kapacitásfeltételek alakítják [P32]. Ennek működési értelmezése, hogy a gyakran keresett változatok előkészítése és a bizonytalanabb igények későbbi konfigurálása kombinálható. A választott aránynak azonban összhangban kell állnia a vállalható határidővel. A halasztás mértékének

megválasztásakor az előzetes elköteleződés kockázatát és a későbbi teljesítés ráfordításait kell mérlegelni.
A digitalizáció a halasztás működtetését több ponton támogathatja. Összerendelheti a beérkező igényt a közös termékalappal, ellenőrizheti a változatspecifikus anyagok elérhetőségét, és aktualizálhatja az ellátási feladatokat. Egy termékalap végső csomagolásának kiválasztásakor például egyszerre szükséges a rendelési verzió, a csomagolóanyag és a munkaállomási terhelés ismerete. Az integráció ezeknek a döntéseknek az összehangolását támogatja. A halasztás és a logisztikai rugalmasság kapcsolatát vizsgáló empirikus eredmények ugyanakkor azt mutatják, hogy a kedvező összefüggés a logisztikai integráció és a keresleti bizonytalanság szintjétől is függ, így nem feltétlenül a legnagyobb bizonytalanságnál a legerősebb [P2].
E kutatások alapján a postponement az információ és a végrehajtási rugalmasság összekapcsolásának stratégiájaként értelmezhető. Az elméleti modellek a készlet- és kapacitáskorlátok közötti kompromisszumokat teszik elemezhetővé, míg a vállalati vizsgálatok az alkalmazás környezeti feltételeit tárják fel. A kiskereskedelmi eredmények azonban nem vihetők át változtatás nélkül az ipari végszerelésre: eltérhet a műveleti sorrend, a termékstruktúra és a belső anyagáramlás kötöttsége. A konkrét ipari alkalmazás értékeléséhez ezért meg kell határozni, mely tevékenység halasztható, milyen új információ érkezik a döntésig és milyen erőforrások állnak rendelkezésre utána.

3.2.6. A digitális képességek hasznosulásának feltételei és korlátai

A digitális képességek hasznosulását, vagyis a technológiai lehetőség és a tartós működési eredmény közötti kapcsolatot több technológiai és szervezeti feltétel befolyásolja. A szociotechnikai rendszerelmélet szerint egy szervezet vagy munkafolyamat nem érthető meg kizárólag a technológia (gépek, szoftverek) vagy kizárólag az emberi tényezők (kultúra, szerepek, igények) vizsgálatával, mert a két oldal kölcsönösen befolyásolja egymást. E megközelítés alapján az Ipar 4.0 megvalósítása a technikai rendszer, az emberek és a szervezeti működés közös átalakítását igényli [P33]. A logisztikai alkalmazások szakirodalma szintén technológiai, szervezeti és gazdasági befolyásoló tényezőket azonosít [P34]. A hasznosulás korlátait ezért a támogatandó döntés felől célszerű értelmezni: más fejlesztés szükséges, ha az adat hiányzik, ha a rendszerek eltérően értelmezik, vagy ha az információ rendelkezésre áll, de nincs lehetőség a beavatkozásra.
Az első feltétel a megfelelő adatminőség és a rendszerek együttműködése. Az adat értékét a pontosság mellett a felhasználási helyzethez való illeszkedés, az értelmezhetőség és a hozzáférhetőség is meghatározza [P35]. Az interoperabilitás pedig túlmutat a technikai adatátvitelen: a rendszereknek a továbbított tartalmat következetesen kell értelmezniük [P36]. Egy késleltetett differenciálásra épülő folyamatban például a készlet, a foglalás és a felszabadítás állapotának eltérő jelentése megakadályozhatja a helyes feladatkiadást. Ebből következik a törzsadatok, az időbélyegek és az állapotváltási szabályok egységesítésének igénye.
A második feltétel a döntési feladathoz igazodó időszerűség és a beavatkozás lehetősége. A heti kapacitásértékelés és a közvetlen anyagellátás eltérő adatfrissítést igényel, ezért a valós idejű működést a szükséges reakcióidőhöz kell viszonyítani. Az időszerűbb adat előnye csak akkor érvényesül, ha a tervmódosítás, a jóváhagyás és a végrehajtás is elég gyors. Szervezeti szinten ehhez közös prioritások és meghatározott döntési jogkörök szükségesek. Ha a termelés és a raktár saját helyi célját követi, az informatikai összekapcsolás mellett is fennmaradhat a koordinációs probléma, a technikai és szervezeti változás ezért együttesen értékelendő [P33].

A vállalati adottságok befolyásolják, hogy ezek a feltételek milyen ütemben és milyen mértékben alakíthatók ki. A magyarországi vállalati tapasztalatokat vizsgáló kutatás a nagyvállalatok és a kis- és középvállalatok eltérő lehetőségeit, továbbá az erőforrások és a szervezeti ellenállás szerepét hangsúlyozza [P37]. Egy újabb, kis- és középvállalatokra irányuló vizsgálat szintén arra jut, hogy a technológia elérhetősége mellett a kompetenciák és a szervezeti cselekvőképesség hiánya akadályozhatja az átalakulást [P38]. Eredményeik alapján a vállalati méret önmagában nem magyarázza a fejlettséget, de az erőforrás- és képességkülönbségek fontos értelmezési környezetet adnak a DFI összehasonlításához.
További feltétel a gazdasági megvalósíthatóság, amelyet a teljes működési folyamatra kell értékelni. A beruházás mellett az integráció, az adatrendezés, a képzés és a fenntartás ráfordításai is megjelennek. A raktári Logisztika 4.0 szakirodalma számos lehetséges előnyt tárgyal, de azok számszerű alátámasztása és kontextusa nem minden esetben egyformán részletes [P34]. A konkrét fejlesztés eredménye például a készlethiány csökkenésével, a kisebb készlettel, a rövidebb átfutási idővel vagy a teljesíthető rendelések számának növekedésével értékelhető. A hasznosulás kimutatásának is van korlátja: ha a bevezetést kapacitásbővítés is kíséri, az együttes javulásból külön elemzés nélkül nem állapítható meg a digitális információ önálló hozzájárulása.
A rendszerek összekapcsolása új technológiai függőségeket és működési kockázatokat is létrehozhat. Az ipari IoT heterogén, gyakran hosszú élettartamú eszközöket kapcsolhat hálózatba, ezért a hozzáférés, a biztonság és az üzembiztos működés az architektúra része [P39].

3.3. A szakirodalom szintézise és a halasztási stratégia vizsgálatának megalapozása

A szakirodalmi áttekintés és a tudománymetriai elemzés alapján az Ipar 4.0, a digitalizáció, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia egymáshoz kapcsolódó kutatási területek, amelyek közös kérdése a termelési és logisztikai rendszerek alkalmazkodóképességének javítása. Az áttekintett eredmények szerint az egyes technológiák, működési képességek és logisztikai stratégiák közötti kapcsolat összetett, ezért azok hatása nem értelmezhető egymástól függetlenül. A digitalizáció által biztosított technológiai lehetőségek önmagukban nem garantálják a logisztikai rugalmasság növekedését, a tényleges eredmény attól is függ, hogy a vállalat milyen mértékben képes ezeket a lehetőségeket működési folyamataiba és döntéshozatali rendszerébe integrálni.
A kutatás kiindulópontja a keresleti bizonytalanság, amely a jövőbeni vevői igények mennyiségének, összetételének és időbeli jelentkezésének korlátozott előrejelezhetőségéből ered. A bizonytalanság következményei a termelési és logisztikai rendszer több területén is megjelenhetnek, így különösen a készletgazdálkodásban, a kapacitástervezésben, az anyagellátásban és a rendelésteljesítésben. A kereslet változásaihoz való alkalmazkodás az erőforrások mennyisége mellett azok időben megfelelő felhasználásától, a folyamatok összehangolásától és a döntési információk rendelkezésre állásától is függ. A szakirodalom alapján az információ értékét elsősorban az határozza meg, hogy felhasználásával milyen működési döntések hozhatók meg, és azok milyen mértékben javítják a rendszer teljesítményét [P6, P7, P11].
Az Ipar 4.0 és a Logisztika 4.0 technológiái támogathatják a termelési és logisztikai folyamatok megfigyelését, elemzését és irányítását. A kiber-fizikai rendszerek, a dolgok internete, a digitális ikrek, a nagy adathalmazok elemzése és a mesterséges intelligencia alkalmazása hozzájárulhat a folyamatok láthatóságának növeléséhez, a működési összefüggések

feltárásához és a változások előrejelzéséhez. A digitális megoldások gyakorlati haszna az adatok feldolgozásán, a döntéstámogatáson és a fizikai folyamatokba történő visszacsatoláson keresztül érvényesülhet. A technológiai integráció így lehetőséget teremthet a termelési és logisztikai folyamatok összehangoltabb, gyorsabb és rugalmasabb működtetésére [P13, P14, P15].

A digitális technológiák alkalmazásának eredményességét ugyanakkor a vállalat digitális fejlettsége, szervezeti adottságai és működési képességei egyaránt befolyásolják. A szakirodalomban bemutatott digitális érettségi modellek rámutatnak arra, hogy a digitális fejlődés több dimenzióban zajlik, amelyben a technológiai infrastruktúra mellett a stratégiai szemlélet, az információs rendszerek integrációja, a szervezeti kultúra és a munkavállalói kompetenciák is befolyásolják a fejlettséget [P1, P19]. A vállalat digitális fejlettsége ezért nem írható le kizárólag az alkalmazott technológiák számával vagy azok korszerűségével. A digitális megoldások tényleges hasznosulása szempontjából az is lényeges, hogy a rendelkezésre álló információk milyen mértékben támogatják a működési döntéseket és a változó körülményekhez történő alkalmazkodást.

A digitalizáció önmagában nem garantálja a logisztikai rugalmasság javulását. A logisztikai rugalmasság a rendszer azon képességeként értelmezhető, amely lehetővé teszi a megváltozott igényekhez és működési feltételekhez történő alkalmazkodást elfogadható idő-, költség- és teljesítménykövetkezmények mellett. A rugalmasság több dimenzióban jelenhet meg, többek között a rendelési volumen, a termékösszetétel, a teljesítési idő, a szállítási útvonalak és az erőforrás-kapacitások tekintetében. E dimenziók egymással összefüggenek, ugyanakkor eltérő működési feltételeket és alkalmazkodási lehetőségeket jelentenek. A logisztikai rendszer rugalmasságának értékelése ezért megköveteli a változás tárgyának, a rendelkezésre álló erőforrásoknak és a teljesítési követelményeknek az együttes figyelembevételét [P24, P25].

A keresleti bizonytalanság kezelésének egyik lehetséges stratégiai megoldása a halasztási stratégia (postponement), amely a termelési és logisztikai tevékenységek időzítésének tudatos megváltoztatására épül. A stratégia alapgondolata, hogy a termék végső kialakítását, differenciálását vagy bizonyos logisztikai műveletek végrehajtását olyan későbbi időpontra helyezik át, amikor már pontosabb információk állnak rendelkezésre a tényleges vevői igényekről. A halasztás elméleti előzményeit a korai szakirodalmi munkák [P40, P41] alapozták meg, míg későbbi kutatások a stratégia különböző megvalósítási formáit és ellátási láncokra gyakorolt hatásait vizsgálták [P30, P42, P43].

A halasztási stratégia olyan környezetben lehet előnyös, ahol a kereslet nehezen előre jelezhető, a termékválaszték széles, illetve a vevői igények gyorsan változnak. A közös alapanyagok, alkatrészek vagy félkész termékek alkalmazása lehetővé teheti, hogy a vállalat a végső termékváltozatokat csak a tényleges igények ismeretében alakítsa ki. Ez mérsékelheti a nem megfelelő termékváltozatokból felhalmozódó készletek kockázatát, és támogathatja a tömeges testre szabás megvalósítását. A stratégia eredményessége azonban a termékstruktúrától, a gyártási és logisztikai folyamatok kialakításától, valamint a rendelkezésre álló kapacitásoktól is függ. A halasztás ezért nem minden termék és működési környezet esetében jelent kedvezőbb megoldást a hagyományos termelési és készletezési stratégiáknál [P30, P42, P43].

A halasztási stratégia és a logisztikai rugalmasság közötti kapcsolat a jelen kutatás egyik központi kérdése. A halasztás egyrészt növelheti a vállalat alkalmazkodási lehetőségeit azáltal, hogy bizonyos termelési és logisztikai döntéseket későbbi időpontra helyez át. Másrészt a késleltetett műveletek végrehajtása megfelelően összehangolt anyagellátást, rendelkezésre álló kapacitásokat és rövid reakcióidőt igényel. A döntések késleltetése tehát csökkentheti a

keresleti bizonytalanságból eredő készletkockázatot, ugyanakkor növelheti a végrehajtási szakasz időbeli és erőforráskorlátainak jelentőségét. Ebből következően a halasztási stratégia eredményessége nem választható el a logisztikai rendszer tényleges alkalmazkodóképességétől. Az Ipar 4.0-technológiák és a digitalizáció e kapcsolatban elsősorban az információáramlás, a döntéstámogatás és a folyamatkoordináció fejlesztésén keresztül tölthetnek be szerepet. Az integrált információs rendszerek lehetővé tehetik a rendelési igények, a készletállapotok, a gyártási kapacitások és a belső logisztikai feladatok együttes értékelését. A pontosabb és gyorsabban rendelkezésre álló információk támogathatják a halasztott műveletek időzítését, az erőforrások hozzárendelését és a működési tervek módosítását. A digitalizáció azonban ebben az esetben is elsősorban lehetőséget teremt a rugalmasabb működésre, amelynek tényleges megvalósulását a fizikai rendszer adottságai és a szervezeti döntési mechanizmusok határozzák meg.

A halasztási stratégia és a digitalizáció kapcsolatát vizsgáló empirikus kutatások szintén arra utalnak, hogy az informatikai képességek és a logisztikai integráció szerepe jelentős lehet, ugyanakkor a kapcsolatot a működési környezet sajátosságai is befolyásolják. Az empirikus eredmények [P2] alapján a halasztás és a logisztikai rugalmasság közötti összefüggés a keresleti bizonytalanság és a logisztikai integráció függvényében eltérően alakulhat. A [P3] kutatás az informatikai képességek és az ellátási lánc életképessége közötti kapcsolatban a postponement közvetítő szerepét, valamint a piacorientáció és a keresleti bizonytalanság moderáló szerepét vizsgálja. Ezek az eredmények alátámasztják a két terület együttes vizsgálatának indokoltságát, ugyanakkor nem jelentik azt, hogy a magasabb digitális fejlettség minden esetben a halasztási stratégia eredményesebb alkalmazásával jár együtt.

A szakirodalom szintézise alapján a digitalizáció, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia kapcsolata vállalati és operatív szinten vizsgálható. Vállalati szinten elsősorban az vizsgálható, hogy a digitális fejlettség és a működési képességek milyen összefüggést mutatnak a logisztikai rugalmassággal, illetve a halasztási stratégia alkalmazásával. Operatív szinten ugyanakkor az a kérdés kerül előtérbe, hogy a rendelkezésre álló információk, erőforrások és működési korlátok mellett hogyan szervezhetők meg a halasztott termelési és logisztikai műveletek, valamint milyen mértékben képes a rendszer alkalmazkodni a rendelési volumen és a termékösszetétel változásaihoz.

A vállalati szintű vizsgálat szükségessé teszi a digitális fejlettség többdimenziós értékelését. A szakirodalomban bemutatott érettségi modellek elméleti kiindulópontot adnak ehhez, ugyanakkor a különböző modellek eltérő dimenziókat, értékelési szempontokat és fejlődési szinteket alkalmaznak. A digitális fejlettség számszerűsítése ezért olyan, a vizsgált vállalati környezethez illeszkedő értékelési megközelítést igényel, amely a technológiai jellemzők mellett a stratégiai és adaptív képességeket is figyelembe veszi. Ez lehetőséget teremt a vállalatok digitális fejlettségének összehasonlítására, valamint a logisztikai rugalmassággal és a halasztási stratégia alkalmazásával fennálló összefüggések empirikus elemzésére.

Az operatív szintű vizsgálat ezzel párhuzamosan a digitalizált postponement logisztikai rendszer működési folyamatainak és döntési kapcsolatainak feltárását igényli. A halasztott műveletek megvalósítása során a termelési és logisztikai feladatok egymásra épülnek, ezért azok összehangolt tervezése szükséges. A rendszer működésének értelmezéséhez egyaránt figyelembe kell venni a fizikai anyagáramlást, az információk feldolgozását, a döntési folyamatokat és a rendelkezésre álló erőforrásokat. A matematikai modellezés ebben az összefüggésben lehetőséget ad a működési korlátok formalizálására, az operatív döntések összehangolására és a különböző működési konfigurációk összehasonlítására.

A logisztikai rugalmasság operatív értékeléséhez több teljesítményjellemző együttes vizsgálata szükséges. A rendszer alkalmazkodóképessége többek között a teljesíthető rendelési volumen, a termékösszetétel változásának kezelése, a logisztikai feladatok határidőre történő végrehajtása és a reakcióidő alapján vizsgálható [S1]. E szempontok együttes értékelése lehetővé teheti annak meghatározását, hogy az adott erőforrásokkal működő rendszer milyen mértékben képes alkalmazkodni a keresleti és működési feltételek változásaihoz.
A szakirodalmi áttekintés alapján a digitális technológiák által biztosított információs és döntéstámogatási lehetőségek, a vállalatok digitális fejlettsége, valamint a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia egymással összefüggő, de eltérő szinten értelmezhető tényezők. A digitalizáció a működési információk rendelkezésre állását és felhasználását támogathatja, a logisztikai rugalmasság a változó feltételekhez történő alkalmazkodás képességét fejezi ki, míg a halasztási stratégia a bizonytalanság kezelésére szolgáló termelési és logisztikai megközelítést jelent. E tényezők együttes vizsgálata lehetőséget teremt a vállalati digitális fejlettség és a logisztikai működés kapcsolatának részletesebb értelmezésére, valamint a digitalizált postponement rendszerek működési és optimalizálási kérdéseinek elemzésére.
A bemutatott elméleti összefüggések és a tudománymetriai elemzés eredményei egyaránt indokolják a digitalizáció, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia kapcsolatának további vizsgálatát. A következő alfejezet a feltárt hiányterületeket határozza meg, és ezekre építve megalapozza az értekezés kutatási célkitűzéseit és az alkalmazott vizsgálati módszerek kiválasztását.

3.4. Kutatási rés azonosítása

Az Ipar 4.0-technológiák, a Logisztika 4.0 és a digitális érettség külön-külön is számottevő szakirodalommal rendelkeznek. Az áttekintett tanulmányok foglalkoznak az egyes tényezők vállalati és logisztikai folyamatokra gyakorolt hatásával, ugyanakkor a feldolgozott szakirodalomban kevés olyan kutatást azonosítottam, amely e területek összefüggéseit egységes keretben elemzi.
Az áttekintett források között kevés olyan empirikus kutatás szerepel, amely együttesen vizsgálja a vállalatok digitális fejlettségét, logisztikai rugalmasságát és a halasztási stratégia alkalmazását, különös tekintettel a nagy keresleti bizonytalansággal jellemezhető környezetre. A magyarországi iparvállalatok esetében az áttekintett források között szintén kevés empirikus eredmény szerepel arra vonatkozóan, hogy a digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák alkalmazása milyen kapcsolatban áll a logisztikai rugalmassággal, illetve a halasztási stratégia alkalmazásával.
A digitális fejlettség vállalati szintű mérésében további vizsgálati igény jelentkezik. Bár a szakirodalomban több digitális érettségi modell és értékelési megközelítés található, a vizsgált modellek között kevés olyan összetett mutatószámot azonosítottam, amely a jelen kutatás szempontjából releváns dimenziók együttes figyelembevételével teszi lehetővé a vállalatok digitális fejlettségének számszerűsítését, valamint annak vizsgálatát, hogy a digitális fejlettség milyen kapcsolatban áll a logisztikai rugalmassággal és a halasztási stratégia alkalmazásával.
A szakirodalmi elemzés alapján további vizsgálati lehetőség kínálkozik a postponement logisztikai rendszerek rendszerszintű leírásában. A digitalizáció, a halasztási stratégia és a logisztikai folyamatok kapcsolatának vizsgálata mellett indokolt egy olyan működési modell kialakítása, amely egységes rendszerben jeleníti meg a halasztási stratégia megvalósításához kapcsolódó anyag-, információ- és döntési folyamatokat, valamint a digitális megoldások szerepét.

További vizsgálati igény azonosítható a digitalizált postponement logisztikai rendszerek operatív döntéstámogatása és logisztikai rugalmasságának kvantitatív értékelése területén. Az áttekintett források között kevés olyan integrált megközelítés szerepel, amely a rendelkezésre álló erőforrások és működési feltételek figyelembevételével egyaránt támogatja a rendszer operatív optimalizálását és a logisztikai rugalmasság különböző dimenzióinak számszerű értékelését.
A feltárt kutatási hiányokhoz kapcsolódva az értekezés a digitalizáció, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia kapcsolatának empirikus vizsgálatára, a digitális fejlettség többdimenziós értékelésére, valamint a digitalizált postponement logisztikai rendszerek működésének modellezésére és rugalmasságának kvantitatív értékelésére fókuszál.

4. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI ÉS A VIZSGÁLT FŐBB TERÜLETEK

A szakirodalmi áttekintés és a tudománymetriai elemzés bemutatta az Ipar 4.0, a digitalizáció és a vállalati digitális fejlettség termelési és logisztikai folyamatokhoz kapcsolódó szerepét, valamint a tématerületek kutatási aktivitását. A digitalizáció, a logisztikai rugalmasság és a keresleti bizonytalanság kezelésére alkalmazható logisztikai stratégiák közötti összefüggések azonban további vizsgálatot igényelnek. Ezért azt kívánom feltárni, hogy a digitális technológiák és a vállalatok digitális fejlettsége milyen módon járulhatnak hozzá a logisztikai rendszerek alkalmazkodóképességének növeléséhez, valamint milyen feltételek mellett támogathatják a halasztási stratégia hatékony alkalmazását.

Az értekezés átfogó célja annak vizsgálata, hogy az Ipar 4.0 és a digitalizáció által biztosított technológiai és információs lehetőségek miként járulhatnak hozzá a logisztikai rugalmasság növeléséhez és a nagy keresleti bizonytalanságból származó működési problémák kezeléséhez. A kutatás ezen belül a vállalati digitális fejlettség, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia közötti kapcsolatokra összpontosít. További célom olyan mutatók és modellek kidolgozása, amelyek lehetővé teszik a digitális fejlettség és a logisztikai rugalmasság számszerű értékelését, valamint támogatják a postponement logisztikai rendszerek operatív döntéseinek optimalizálását.

Ennek érdekében a kutatás során az alábbi konkrét célkitűzéseket határoztam meg:

- A logisztikai rugalmasság szerepének és meghatározó tényezőinek vizsgálata Ipar 4.0-környezetben: Célom annak feltárása, hogy a digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiái milyen kapcsolatban állnak a logisztikai rendszerek rugalmasságával, valamint mely tényezők támogatják, illetve korlátozzák a vállalatok alkalmazkodóképességét. Ennek keretében vizsgálom a magyarországi gyártó- és logisztikai vállalatok logisztikai rugalmasságát, különös tekintettel a keresleti bizonytalanság kezelésére, a rugalmasságot befolyásoló erőforrásokra és az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó technológiák logisztikai alkalmazására.
- A halasztási stratégia alkalmazási lehetőségeinek és logisztikai jelentőségének vizsgálata: Célom annak feltárása, hogy a halasztási stratégia milyen szerepet tölthet be a nagy keresleti bizonytalanság kezelésében, továbbá milyen összefüggések azonosíthatók a stratégia alkalmazása, a vállalati digitalizáció és a logisztikai rugalmasság között. A vizsgálat kiterjed a stratégia alkalmazását támogató és korlátozó tényezők azonosítására is.
- A vállalati digitális fejlettség számszerűsítése, valamint a logisztikai rugalmassággal és a halasztási stratégiával fennálló kapcsolatának vizsgálata: Célom a Digitális Fejlettségi Index (DFI) kialakítása, amely a stratégiai, technológiai és adaptív dimenziók együttes figyelembevételével lehetővé teszi a vállalatok digitális fejlettségének számszerűsítését és összehasonlítását. Az index alkalmazásával vizsgálom a digitális fejlettség, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia közötti kapcsolatokat, különös tekintettel arra, hogy a digitális fejlettség milyen összefüggést mutat a keresleti változásokhoz való alkalmazkodás képességével.
- A digitalizált postponement logisztikai rendszer működési és optimalizálási modelljének kidolgozása: Célom egy olyan általános működési modell kialakítása, amely egységes keretben mutatja be a digitalizált postponement logisztikai rendszer fő elemeit, azok kapcsolatait, valamint az anyag- és információáramlási folyamatokat. Erre építve integrált matematikai döntéstámogató modellt kívánok kidolgozni, amely a gyártási

rendelésekhez kapcsolódó termelési és belső logisztikai döntések összehangolt optimalizálását támogatja.

- A postponement logisztikai rendszer rugalmasságának kvantitatív értékelése: Célom olyan rugalmassági mutatók meghatározása, amelyek segítségével számszerűsíthető a vizsgált rendszer alkalmazkodóképessége. Ennek keretében vizsgálom, hogy a rendelkezésre álló logisztikai erőforrások és a működési feltételek változása milyen hatást gyakorol a teljesíthető rendelési volumenre és az operatív logisztikai teljesítményre.

A meghatározott kutatási célok egymásra épülő vizsgálati rendszert alkotnak. A kutatás első része a logisztikai rugalmasság, a digitalizáció és a halasztási stratégia közötti összefüggések feltárására irányul. Erre épül a vállalati digitális fejlettség számszerűsítése, majd a digitalizált postponement logisztikai rendszer koncepcionális és matematikai modellezése. A kutatás utolsó szakaszában az operatív optimalizálási modell eredményeire támaszkodva számszerűen értékelem a rendszer rugalmasságát.

5. A KUTATÁS MÓDSZERTANI KERETE

Az értekezés kutatási céljainak megvalósításához több, egymásra épülő módszer alkalmazására volt szükség. A kutatás szakirodalmi és tudománymetriai elemzéssel kezdődött, ezt követte a vállalati kérdőíves felmérés és annak statisztikai értékelése. A kérdőíves vizsgálat adataira támaszkodva alakítottam ki a Digitális Fejlettségi Indexet (DFI). A kutatás következő szakaszában a digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modelljét, majd annak operatív optimalizálására alkalmas matematikai modelljét dolgoztam ki. A matematikai modellhez kapcsolódóan a rendszer rugalmasságának számszerű értékelésére szolgáló mutatókat is kidolgoztam. A kutatási folyamat így a vállalati gyakorlat empirikus vizsgálatától a digitalizált postponement rendszer modellezéséig és operatív értékeléséig terjed.

A kutatás első szakaszát a kapcsolódó hazai és nemzetközi szakirodalom feldolgozása jelentette. Ennek során az Ipar 4.0, a digitalizáció és a digitális fejlettség, a logisztikai rugalmasság, a keresleti bizonytalanság, valamint a postponement stratégia szakirodalmi hátterét és ezek összefüggéseit vizsgáltam. A szakirodalmi áttekintést a Scopus adatbázisra épülő tudománymetriai elemzéssel egészítettem ki. Az elemzés kiterjedt az egyes kutatási témák publikációs aktivitásának időbeli változására és a témák együttes előfordulására. Az együttes előfordulások bemutatására hőtérképet, relatív gyakoriságuk összehasonlítására pedig a relatív publikációs intenzitás (RPI) mutatóját alkalmaztam. A vizsgálat eredményei hozzájárultak a lehetséges kutatási hiányterületek azonosításához és az empirikus kutatás irányainak kijelöléséhez. A tudománymetriai vizsgálat részletes módszertanát és eredményeit a 3. fejezet mutatja be.

Az empirikus kutatás alapját egy 2025-ben végzett kérdőíves felmérés képezte. A vizsgálatban 27 Magyarországon működő iparvállalat logisztikai vagy ellátásilánc-területen dolgozó döntéshozója vett részt [S2]. Célzott mintavételt alkalmaztam, hogy a válaszadók megfelelő ismeretekkel rendelkezzenek vállalatuk logisztikai és ellátásilánc-folyamatairól. A vizsgált vállalatok méretükben, tulajdonosi hátterükben, iparági hovatartozásukban és földrajzi elhelyezkedésükben is különböztek. A felmérés elsődleges célja a logisztikai rugalmassággal kapcsolatos összefüggések és jellemző vállalati mintázatok feltárása volt. Az eredmények elsősorban a vizsgált vállalati mintára vonatkozóan értelmezhetők, ugyanakkor kiindulópontot adhatnak a témakör további kutatásához.

A kérdőíves vizsgálat első része a logisztikai rugalmasságra irányult. Azt vizsgáltam, hogy a vállalatok milyen mértékben képesek alkalmazkodni a kereslet változásaihoz, mely területeken jelenik meg leginkább a rugalmasság, illetve milyen kapcsolat figyelhető meg a digitalizáció, az Ipar 4.0 technológiáinak alkalmazása és a logisztikai rugalmasság között. A második vizsgálati terület a postponement stratégia alkalmazását érintette. Ennek során azt vizsgáltam, hogy milyen vállalati feltételek segítik vagy korlátozzák a halasztás alkalmazását, és milyen kapcsolat figyelhető meg a postponement, a digitalizáció és a logisztikai rugalmasság között.

A kérdőíves adatok értékeléséhez leíró statisztikai módszereket, köztük gyakorisági vizsgálatokat, valamint kereszttábla-elemzéseket alkalmaztam. A statisztikai eredményeket minden esetben a minta elemszámának figyelembevételével értékeltem. A számszerű elemzéseket SWOT-elemzés egészítette ki, amelynek segítségével rendszereztem a logisztikai rugalmasság és a postponement alkalmazását támogató, illetve korlátozó tényezőket. A két empirikus vizsgálat részletes módszertanát a 6.2. és a 7.2. fejezet tartalmazza.

A vállalatok digitális fejlettségének összehasonlítható értékelésére Digitális Fejlettségi Indexet (DFI) alakítottam ki, amelyet a kapcsolódó közleményemben Digitalization Development

Index (DDI) néven mutattam be [S2]. Az index kialakítását az indokolta, hogy a vállalat digitális fejlettsége egyetlen technológia alkalmazásával vagy vállalati jellemzővel nem írható le megfelelően. A DFI ezért több szempontot együttesen vesz figyelembe. Az index kialakítása során a digitalizáció stratégiai, technológiai és adaptív jellemzőit vettem alapul. A vizsgált tényezők között szerepel a digitalizációs stratégia, a digitális és Ipar 4.0 technológiák alkalmazása, az informatikai rendszerek összekapcsoltsága, valamint a vállalat átláthatósághoz, predikcióhoz és adaptivitáshoz kapcsolódó képessége.

Az egyes tényezők alapján vállalatonként meghatározott DFI-érték lehetőséget adott a vállalatok digitális fejlettségének számszerű összehasonlítására. Az elemzést hierarchikus klaszterelemzéssel egészítettem ki, amelynek segítségével hasonló digitális jellemzőkkel rendelkező vállalatcsoportokat azonosítottam. A csoportosítás alapján azt is vizsgáltam, hogy a különböző digitális fejlettségű vállalatcsoportok milyen összefüggést mutatnak a postponement stratégia alkalmazásával. A DFI kialakításának és alkalmazásának részletes módszertanát a 8. fejezet ismerteti.

A kutatás modellezési szakasza a digitalizált postponement logisztikai rendszer működésének leírására és optimalizálására irányult. Első lépésként a rendszer általános működési modelljét dolgoztam ki. A modellben két, egymással szoros kapcsolatban álló réteget különítettem el: a digitális információs és döntéstámogató rendszert, valamint a fizikai végrehajtási rendszert. Az előbbi feladata a működéshez szükséges információk gyűjtése, feldolgozása és a döntések támogatása, míg az utóbbi a termelési és logisztikai feladatok tényleges végrehajtását foglalja magában. A két réteg közötti információáramlás és visszacsatolás lehetővé teszi a keresleti és működési feltételek változásainak felismerését és a megfelelő működési válaszok kialakítását. Az általános működési modellt a 9.1. fejezet részletesen bemutatja.

A működési modellhez kapcsolódó operatív optimalizálási modellt az [S1] közleményben bemutatott matematikai megközelítés továbbfejlesztésével dolgoztam ki. Ennek matematikai megfogalmazására vegyes egészértékű lineáris programozást (MILP) alkalmaztam. A modell a gyártási rendelések gyártó- és csomagolósorokhoz való hozzárendelését, az ezekhez kapcsolódó belső logisztikai feladatok időzítését és a milk-run rendszerű anyagellátás megszervezését együttesen kezeli. A döntések meghozatalakor figyelembe veszi a rendelkezésre álló erőforrásokat, a kapacitásokat, a technológiai kapcsolatokat, valamint a teljesítési határidőket. Az optimalizálás két egymásra épülő lépésben történik. Elsőként a modell meghatározza, hogy az adott erőforrások és működési feltételek mellett mekkora rendelési volumen teljesíthető. A második lépésben a modell az első lépésben meghatározott volumentől legfeljebb ε relatív mértékben eltérve optimalizálja a belső logisztikai folyamatok teljesítményét. Így az operatív teljesítménymutatók javulása legfeljebb ε mértékű volumencsökkenéssel járhat, $\varepsilon = 0$ esetén a javulás nem származhat a teljesített volumen csökkentéséből. A második célfüggvény többek között a késéseket, a logisztikai reakcióidőt, a milk-run köröket és a gyártási kapacitások kihasználását veszi figyelembe.

A matematikai modellhez kapcsolódóan a postponement logisztikai rendszer rugalmasságának számszerű értékelésére szolgáló mutatórendszert is kidolgoztam. Ennek keretében öt mutatót határoztam meg, amelyek különböző szempontok alapján jellemzik a rendszer alkalmazkodóképességét: a határidőre teljesített logisztikai feladatok arányát, az átlagos logisztikai reakcióidőt, a mixflexibilitást, a volumenflexibilitást, valamint a logisztikai teljesítmény egyenletességét [S1]. A mutatók lehetővé teszik a különböző működési konfigurációk összehasonlítását, valamint a rendelési volumen, a termékmix és az erőforrások

változásához kapcsolódó alkalmazkodóképesség értékelését. Az optimalizálási modell és a rugalmassági mutatók részletes ismertetését a 9.2. fejezet tartalmazza.
Az alkalmazott módszerek egymásra épülő vizsgálati folyamatot alkotnak. A szakirodalmi és tudománymetriai elemzés alapján azonosított kutatási hiányterületek jelölik ki az empirikus vizsgálatok irányát. A kérdőíves kutatás a vállalati gyakorlatban vizsgálja a logisztikai rugalmasságot, a postponement alkalmazását és a digitalizáció szerepét. A DFI ezekhez kapcsolódva a digitális fejlettség számszerű értékelését teszi lehetővé. A kutatás modellezési része a digitalizált postponement rendszer működését írja le, majd a matematikai modell és a rugalmassági mutatók segítségével értékeli annak operatív teljesítményét és alkalmazkodóképességét. Az empirikus vizsgálat és a modellezés így ugyanannak a kutatási problémának két eltérő szintjét elemzi: hogyan járulhat hozzá a digitalizáció a logisztikai rendszer alkalmazkodóképességéhez nagy keresleti bizonytalanság mellett. A módszerek együttes alkalmazása az értekezés átfogó kutatási céljának vizsgálatát szolgálja.

6. A LOGISZTIKAI RUGALMASSÁG VÁLLALATI JELLEMZŐI ÉS AZ IPAR 4.0 SZEREPE

A logisztikai és szállítási hálózatok az Európai Unió gazdaságának és piaci kapcsolatainak fontos feltételei, működésük szervezettsége gazdasági és környezeti szempontból is jelentős [P44]. A logisztikai rugalmasság a logisztikai működés változó igényekhez történő igazításának képessége, az alkalmazkodás idő-, költség- és teljesítménykövetkezményeinek figyelembevételével [P24]. Az ellátási láncokat érő zavarok kezelésében a rugalmasság, az agilitás és a reagálóképesség egyaránt szerepet kaphat [P4]. Az Ipar 4.0 logisztikai alkalmazásai az információk láthatóságának, az összekapcsoltságnak és az anyagáramlás szervezésének fejlesztésével támogathatják az alkalmazkodást [P4]. Jelen fejezet ezen összefüggések hazai vállalati gyakorlatban történő empirikus vizsgálatára fókuszál.

6.1. A logisztikai rugalmasság vizsgálatának célja és indokoltsága

Az Ipar 4.0 logisztikai alkalmazásainak lehetőségeit és kockázatait áttekintő kutatások mellett empirikus eredmények is rendelkezésre állnak. Eslami és munkatársai az ellátási lánc integrációját, agilitását és a pénzügyi teljesítményt vizsgálták svéd gyártóvállalatok körében, az Ipar 4.0 technológiák szerepét is figyelembe véve [P46]. Jafari és munkatársai kiskereskedelmi környezetben elemezték a halasztási stratégia és a logisztikai rugalmasság kapcsolatát [P2]. A különböző vállalati körök és vizsgálati konstrukciók eredményei mellett indokolt a Magyarországon működő iparvállalatok logisztikai alkalmazkodóképességének külön empirikus vizsgálata. Különösen fontos annak feltárása, hogy a hazai gyártó- és logisztikai vállalatok miként alkalmazkodnak a növekvő keresleti bizonytalansághoz és az ellátási láncokat érintő kihívásokhoz, valamint ebben milyen szerepet töltenek be az Ipar 4.0 technológiák.

Ezen fejezet célja a Magyarországon működő gyártó- és logisztikai vállalatok egy célzott mintájának empirikus elemzése kérdőíves felmérés alapján. Az elemzés során feltárom, hogy a vállalatok mely tényezőket tekintik a logisztikai rugalmasság meghatározó elemeinek, milyen mértékben alkalmaznak Ipar 4.0 technológiákat logisztikai folyamataik támogatására, valamint hogyan értékelik e technológiák szerepét a keresleti bizonytalanság kezelésében.

A kutatás eredményei feltáró jelleggel hozzájárulnak a nagyobb, nemzetközi hátterű vállalatok logisztikai rugalmasságának megismeréséhez, és alapot szolgáltatnak a fejezet végén bemutatott tudományos tézis megalapozásához.

6.2. A logisztikai rugalmasság vizsgálatának módszertana

Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy a vizsgált, Magyarországon működő vállalatok milyen mértékben alkalmazzák az Ipar 4.0 technológiákat logisztikai folyamataik támogatására, valamint hogy ezek milyen kapcsolatban állnak a vállalatok logisztikai rugalmasságával.

A vizsgálat feltáró jellegű kvantitatív kutatás, amely kérdőíves adatgyűjtésen alapul. A kérdőívet 27 magyarországi iparvállalat logisztikai vezetője töltötte ki 2025-ben [S2]. A minta heterogén összetételű: a válaszadók között multinacionális vállalatok, nagyvállalatok, középvállalkozások és kisvállalatok egyaránt szerepeltek, ami lehetővé tette a méret szerinti összehasonlítást. Az adatgyűjtés önkéntes és anonim módon, online kérdőív alkalmazásával valósult meg. A mintavétel célzott módon történt, mivel kizárólag olyan személyek kerültek bevonásra, akik logisztikai vagy ellátási lánc döntéshozói szerepet töltenek be vállalatuknál. A

válaszadók iparági eloszlása kiegyensúlyozott volt: többek között az autóipar, a gépgyártás, az elektronika és az élelmiszeripar képviselői is megjelentek a mintában.
A kutatás során alkalmazott kérdőív három fő témablokkot tartalmazott: vállalati háttérinformációk, a halasztási stratégia jellemzői, valamint digitalizációs és Ipar 4.0 elemek. A kérdések egy része bináris (igen/nem), másik része pedig Likert-skálás, 1-től 6-ig terjedő értékeléssel (1 = egyáltalán nem jellemző, 6 = teljes mértékben jellemző). A kérdőíves kutatások módszertani megalapozásában lényeges a vizsgált fogalmak és az azokat mérő kérdések összhangja, valamint a kérdések egyértelműségének és érthetőségének előzetes ellenőrzése [P47]. Az alkalmazott kérdőívet a véglegesítés előtt belső ellenőrzésnek vetettem alá, a kérdések egyértelműségére és a célcsoport számára való relevanciájára összpontosítva. A kérdőívből származó adatok a postponement stratégia és a digitális fejlettség későbbi vizsgálatához is alapot nyújtottak. Az empirikus eredmények szintézisének támogatására a logisztikai rugalmasság belső és külső tényezőit SWOT-elemzés keretében rendszereztem. A logisztikai rugalmasság és az Ipar 4.0 technológiák kapcsolatának feltárásánál a vizsgálat célja az volt, hogy képet kapjak a hazai cégek logisztikai alkalmazkodóképességéről, valamint arról, milyen mértékben alkalmazzák és értékelik az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó megoldásokat. A kutatás keretrendszerét a 7. ábra tartalmazza.



7. ábra: A kérdőíves kutatás keretrendszere

A bemutatott módszertan lehetővé tette a logisztikai rugalmasságot befolyásoló tényezők, valamint az Ipar 4.0 technológiák vállalati alkalmazása közötti összefüggések empirikus feltárását. Az elemzés eredményeit a következő alfejezet ismerteti.

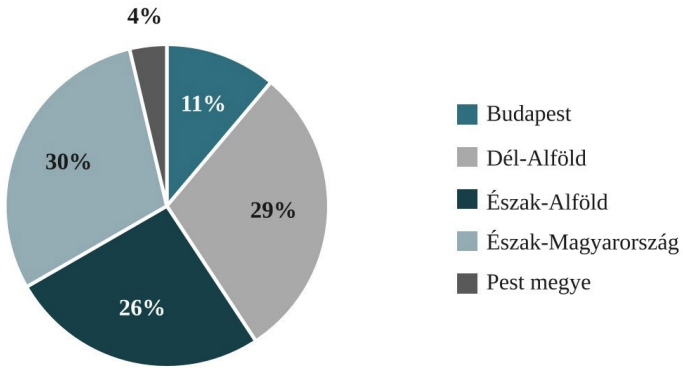
6.3. A logisztikai rugalmasság vizsgálatának eredményei

A kutatás eredményei a kérdőíves felmérésből származó adatok statisztikai elemzésén alapulnak. Az alábbiakban bemutatom a logisztikai rugalmasság egyes dimenzióinak vállalati megítélését, a rugalmasságot befolyásoló tényezőket, valamint az Ipar 4.0 technológiák logisztikai alkalmazásának és a keresleti bizonytalanság kezelésének összefüggéseit.
A kérdőív válaszadói között a nagyobb méretű vállalatok domináltak, különösen a multinacionális cégek, amelyek a válaszadók csaknem felét tették ki. A minta a hazai ipari és logisztikai szektor jelentős szereplőit fedi le, különösen azokat, akik méretükből és nemzetközi beágyazottságukból fakadóan nagyobb kihívásokkal és komplexitással szembesülnek az ellátási láncok és logisztikai folyamatok tervezésében. Jelentős számban képviseltették magukat nagyvállalatok és középvállalkozások is, ami azt mutatja, hogy a felmérés elsősorban olyan szereplők körében került kitöltésre, akik összetett logisztikai rendszerekkel és szélesebb körű digitalizációs lehetőségekkel rendelkeznek (8. ábra).



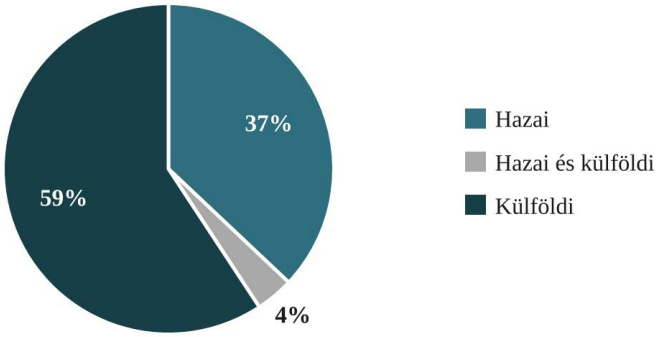
8. ábra: Vállalkozás mérete

Bár kisebb számban, de mikro- és kisvállalkozások is képviseltették magukat, így az eredmények bizonyos mértékig lefedik a magyar gazdaság méret szerinti sokszínűségét is. Ez lehetőséget teremt a különböző vállalati méretkategóriák közötti összehasonlításokra, különösen a digitalizációhoz való viszony vagy a rugalmassági stratégiák alkalmazása terén. A vállalatok méretére vonatkozó kérdést követően a következőkben a földrajzi elhelyezkedésére kérdeztem rá, az eredmény a 9. ábrán látható.



9. ábra: A kérdőívben szereplő vállalatok régiós helyzete

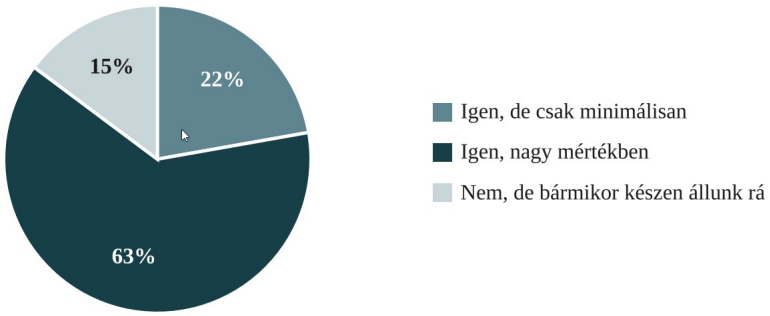
A válaszadók öt területi egységből származnak: Észak-Magyarországról (8), a Dél-Alföldről (8), az Észak-Alföldről (7), Budapestről (3) és Pest megyéből (1). A dunántúli régiókból nem érkezett válasz, ezért a minta földrajzi szempontból sem tekinthető országosnak.
A kutatásból az is kiderült, hogy a válaszadók többsége (16 válaszadó, 59%) külföldi tulajdonú vállalattól érkezett, ami azt mutatja, hogy a felmérés erősen reprezentálja a nemzetközi háttérrel rendelkező, jellemzően nagyobb méretű és erősebb technológiai bázissal bíró ipari szereplőket. Ezeknél a cégeknél az Ipar 4.0 technológiák alkalmazása, valamint a logisztikai rugalmasság kiemelt fókuszterület lehet. (10. ábra)



10. ábra: A vállalatok tulajdonlása

A diagramon látható, hogy a hazai tulajdonú cégek is szép számmal jelen vannak a kutatásban (10 cég), ami biztosítja, hogy a magyar kkv-szektor sajátos szempontjai is megjelenjenek a felmérésben - például a digitalizációs kihívások, a rugalmas alkalmazkodás korlátai, vagy a kisebb volumenű fejlesztési lehetőségek. Egy válaszadó vegyes tulajdonú cégtől érkezett, ahol a hazai és nemzetközi tőke együtt van jelen, ami gyakori jelenség az utóbbi évtizedek magyarországi ipari beruházásaiban.
A kérdőívet kitöltő vállalatok tulajdonosi hátterét tekintve a mintában a külföldi tulajdonban lévő cégek dominálnak: a válaszadók 59%-a tartozik ebbe a kategóriába, míg hazai tulajdonú vállalat 37%-ban, vegyes tulajdonú vállalat pedig 4%-ban szerepel. Ez a megoszlás jelentősen eltér a hazai vállalkozások összetételétől: a Központi Statisztikai Hivatal adatai szerint 2018-ban a Magyarországon működő nem pénzügyi vállalkozásoknak mindössze 2,5%-a állt külföldi irányítás alatt. A legalább 250 főt foglalkoztató vállalkozások körében ugyanakkor a külföldi leányvállalatokhoz tartozott a foglalkoztatottak 58%-a, és ők realizálták az árbevétel és a hozzáadott érték közel háromnegyedét [P48]. A minta összetétele tehát a vállalkozások számához képest torzított, a nagyvállalati szegmens gazdasági súlyát azonban jobban tükrözi.
Ez az eltérés ugyanakkor nem tekinthető mintatorzításnak a vizsgálat célrendszerét figyelembe véve. A kutatás elsősorban a logisztikai rugalmasság, a digitalizációs képességek és az Ipar 4.0 technológiák implementációjának gyakorlati megjelenését kívánja feltérképezni. Ezek azok a területek, ahol a multinacionális, nagyobb volumenű ipari termelést végző vállalatok jelentős tapasztalattal, fejlesztési stratégiával és erőforrásokkal rendelkeznek. E cégek szerepe meghatározó a magyarországi ipar exportorientált szegmenseiben, így válaszaik releváns képet nyújtanak a fejlett logisztikai és gyártási gyakorlatok hazai alkalmazásáról. Ennek megfelelően a minta nem célja a teljes hazai vállalati ökoszisztéma reprezentálása, sokkal inkább fókuszált betekintést ad azoknak a vállalatoknak a működésébe, amelyek tényleges szereplői a modern ipari és logisztikai megoldások térnyerésének Magyarországon.
A következőkben arra kerestem a választ, hogy az elmúlt időszak hatásai (COVID 19, orosz-ukrán konfliktus, gazdasági hatások) hogyan hatottak az iparvállalatokra, át kellett-e alakítaniuk a hosszú távú terveiket ezen tényezők figyelembevételével. (11. ábra)

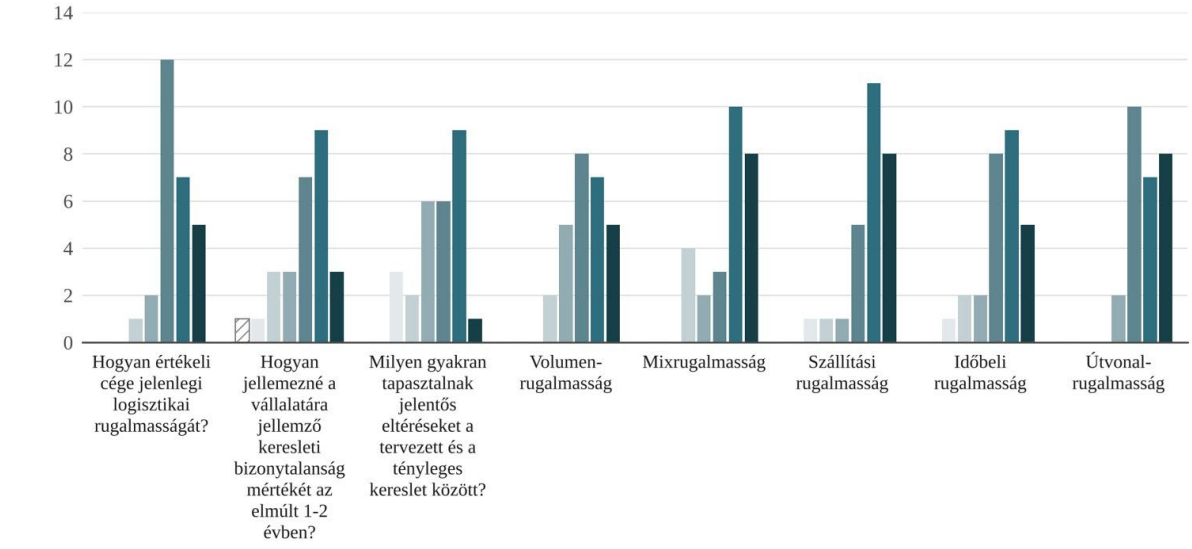
6. Az elmúlt időszak eseményeinek hatására (COVID19, orosz-ukrán konfliktus, magas infláció) át kellett-e alakítani a hosszú távú terveit (min. 5 évet meghaladó időszak)?



11. ábra: A vállalatok hosszú távú stratégiai céljainak átalakítása

A válaszadók 85%-a módosította hosszú távú (5+ éves) stratégiai terveit az elmúlt évek gazdasági és geopolitikai eseményei (COVID-19 járvány, orosz-ukrán háború, magas infláció) hatására: 63%-uk jelentős mértékben, 22%-uk kisebb mértékben. A fennmaradó 15% nem változtatott, de jelezte, hogy szükség esetén kész lett volna rá [S2].

A logisztikai rugalmassághoz kapcsolódóan elsőként arra a kérdésre kerestem a választ, hogy az egyes területek szerint milyen mértékben van jelen az a vállalatuk életében. Mindezt egy 1-től 6-ig terjedő skálán értékelhették, ahol az 1-es az egyáltalán nem, míg a 6-os a teljes mértékben választ jelentette. (12. ábra)



	Hogyan értékeli cége jelenlegi logisztikai rugalmasságát?	Hogyan jellemezné a vállalatára jellemző keresleti bizonytalanság mértékét az elmúlt 1-2 évben?	Milyen gyakran tapasztalnak jelentős eltéréseket a tervezett és a tényleges kereslet között?	Volumen-rugalmasság	Mixrugalmasság	Szállítási rugalmasság	Időbeli rugalmasság	Útvonal-rugalmasság
N/A	0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	3	0	0	1	1	0
2	1	3	2	2	4	1	2	0
3	2	3	6	5	2	1	2	2
4	12	7	6	8	3	5	8	10
5	7	9	9	7	10	11	9	7
6	5	3	1	5	8	8	5	8

12. ábra: A logisztikai rugalmasság értékelése

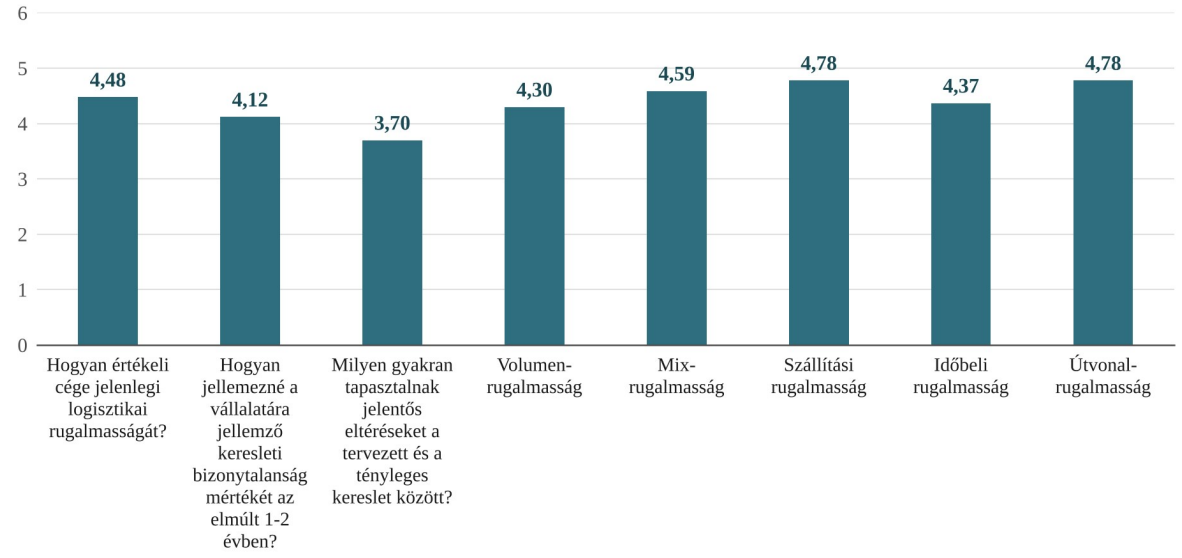
Az eredmények alapján a logisztikai rugalmasság valamennyi vizsgált területen megjelenik a válaszadó vállalatok működésében, azonban egyik dimenzió esetében sem érte el a maximális értéket. A legmagasabb átlagos értékelést a szállítási rugalmasság kapta, ami arra utal, hogy a vállalatok ezen a területen érzik magukat a leginkább alkalmazkodóképesnek. Ezzel szemben a volumenrugalmasság bizonyult a legalacsonyabb értékelésű dimenziónak, ami arra utal, hogy a vállalatok számára a kereslet hirtelen növekedéséhez vagy csökkenéséhez történő gyors alkalmazkodás jelenti a legnagyobb kihívást.

A válaszok értelmezésének egységessége érdekében a kérdőívben a logisztikai rugalmasság egyes dimenziói az alábbi definíciók alapján kerültek meghatározásra:

- Volumenrugalmasság: Vállalatunk képes gyorsan és költséghatékonyan alkalmazkodni a kereslet mennyiségének jelentős növekedéséhez vagy csökkenéséhez.
- Mixrugalmasság: Vállalatunk képes rugalmasan kezelni a termékkínálat változásait (új termékek bevezetése, termékmix módosulása).
- Szállítási rugalmasság: Vállalatunk képes rugalmasan reagálni a szállítási igények változásaira (pl. sürgős szállítások, különböző szállítási módok).
- Időbeli rugalmasság: Vállalatunk képes gyorsan reagálni a változó piaci igényekre és rövid átfutási időket biztosítani.
- Útvonalrugalmasság: Vállalatunk képes alternatív logisztikai útvonalakat és megoldásokat alkalmazni fennakadások esetén.

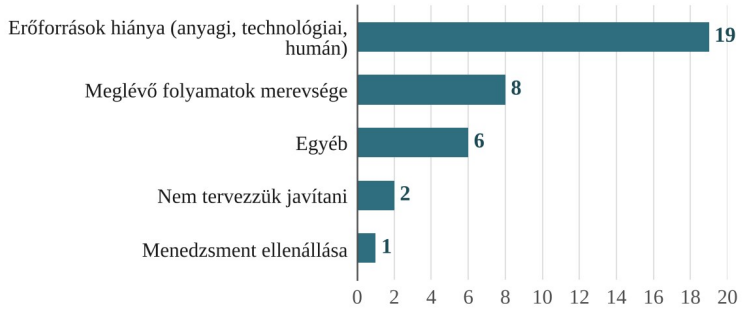
A kérdőívben használt meghatározások a volumen-, a mix- és a szállítási rugalmasság esetében megfelelnek a 3. táblázat értelmezésének, a mixrugalmasság kérdése emellett az új termékek

bevezetésének képességét is magában foglalta. Két dimenzióban azonban eltérés van. Az időbeli rugalmasság kérdése a változó piaci igényekre adott gyors válaszra és a rövid átfutási időre vonatkozott, ami a 3.2.4. alfejezet megkülönböztetése szerint a reagálóképességhez áll közel. A 3. táblázat szerinti ütemezési rugalmasságot, a sorrend és a teljesítési idő módosíthatóságát a kérdőív közvetlenül nem mérte. Az útvonal-rugalmasság kérdése a fennakadások esetén alkalmazható alternatív útvonalakra és megoldásokra irányult, így a zavarokkal szembeni ellenállóképesség egy elemét is tartalmazza, nem csak az anyagáramlás normál működés melletti alternatíváit. A két dimenzió eredményeit ezért a kérdőív megfogalmazásának megfelelően értelmezem: az időbeli rugalmasság értékelése a válaszadók által érzékelt reagálóképességet, az útvonal-rugalmasság értékelése a zavarok kezelésére rendelkezésre álló alternatívákat tükrözi. A 13. ábra a 12. ábrában szereplő dimenziókra adott válaszok átlagát mutatja.

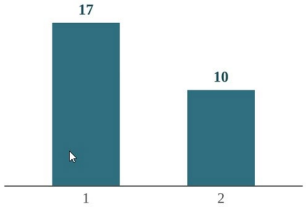


13. ábra: A logisztikai rugalmasság értékelésére adott átlagos válaszok

A 13. ábra alapján a szállítási rugalmasság és az útvonalrugalmasság kapták a legmagasabb értékelést, ami azt jelzi, hogy a válaszadó vállalatok ezeken a területeken ítélik meg a legkedvezőbben logisztikai alkalmazkodóképességüket. Ezzel szemben a volumenrugalmasság átlagos értéke volt a legalacsonyabb, ami arra utal, hogy a vállalatok számára a kereslet mennyiségének hirtelen változásaihoz való alkalmazkodás jelenti a legnagyobb kihívást.
A következő kérdés azt vizsgálta, hogy mely tényezők akadályozzák leginkább a logisztikai rugalmasság fejlesztését a vállalatuknál. Az eredményeket a 14/a. és 14/b. ábra mutatja.

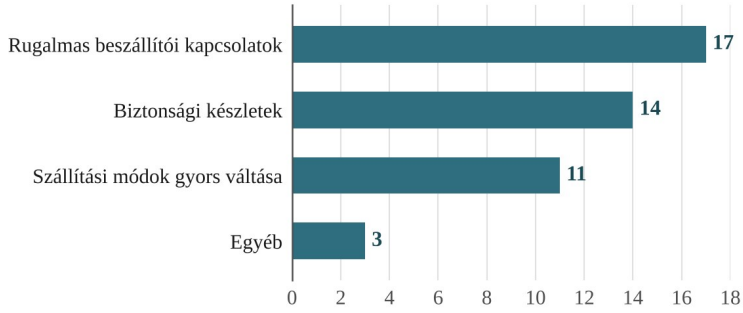


14/a ábra: Akadályozó tényezők a logisztikai rugalmasság javítása szempontjából

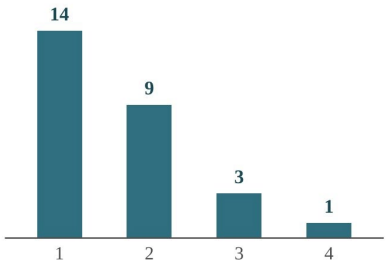


14/b ábra: Válaszok száma

A legnagyobb akadályt az erőforrás hiánya okozza a vállalatoknál, legyen az anyagi, humán vagy akár technológiai. Az egyéb kategóriába a válaszadók leginkább azt jelezték, hogy az ő szempontjukból nincs akadálya. A korábbi válaszokból, illetve a szakirodalomból és a szakemberekkel folytatott beszélgetésekből is kiderült, hogy a legnagyobb problémát a keresleti bizonytalanság, valamint annak a kezelése tudja okozni, így a következőkben ehhez kapcsolódóan arra kerestem a választ, hogy jelenleg milyen intézkedésekkel tudnak rá reagálni (15/a és b ábra).



15/a ábra: Keresleti bizonytalanságra való reagálási lehetőségek

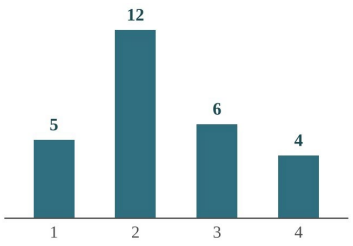


15/b ábra: Válaszok száma

Leginkább a rugalmas beszállítói kapcsolatokra támaszkodnak a válaszadók, és követik a biztonsági készletek alkalmazása. Ha a tényezőket vizsgáljuk, hogy mely tényezők okozzák a legnagyobb keresleti bizonytalanságot, akkor a 16/a ábrán látható, hogy a globális események azok, amik leginkább nehézséget okoznak napjainkban a cégeknél. (16/a és b ábra)



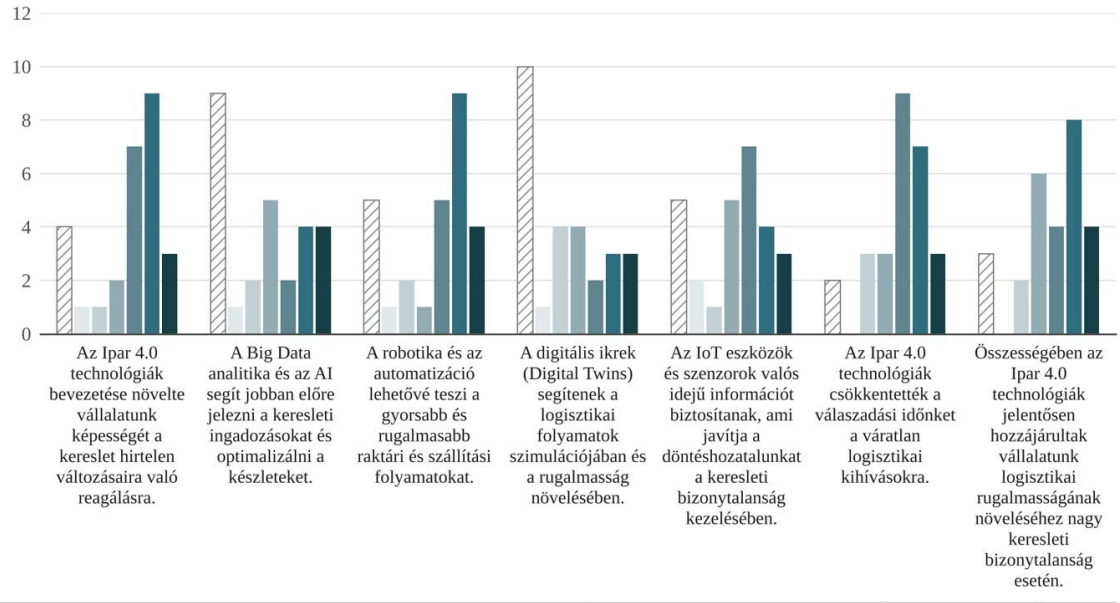
16/a ábra: Keresleti bizonytalanságot okozó tényezők



16/b ábra: Válaszok száma

A globális események problémáin túl a vevői igények hirtelen változása az, ami jelentős szerepet játszik a keresleti bizonytalanság kezelésében. Ezen felül, ami megjelenik ennél a kérdésnél, hogy a válaszadóknak majdnem a fele jelölt legalább kétféle tényezőt. Mindez arra enged következtetni, hogy ezen tényezők kezelése jelentős kihívások elé állítja a szakmában dolgozókat. Ezt követően arra kerestem a választ, hogy az Ipar 4.0 technológiák hogyan befolyásolják a vállalatok szempontjából a logisztikai rugalmasságot nagy keresleti bizonytalanság mellett. Ehhez a korábbiakban is alkalmazott skálázó módszert alkalmaztam, pontozva azt, hogy az egyes szempontok milyen mértékben jellemzők az adott cégre (1-egyáltalán nem, 6-teljes mértékben). (17. ábra)

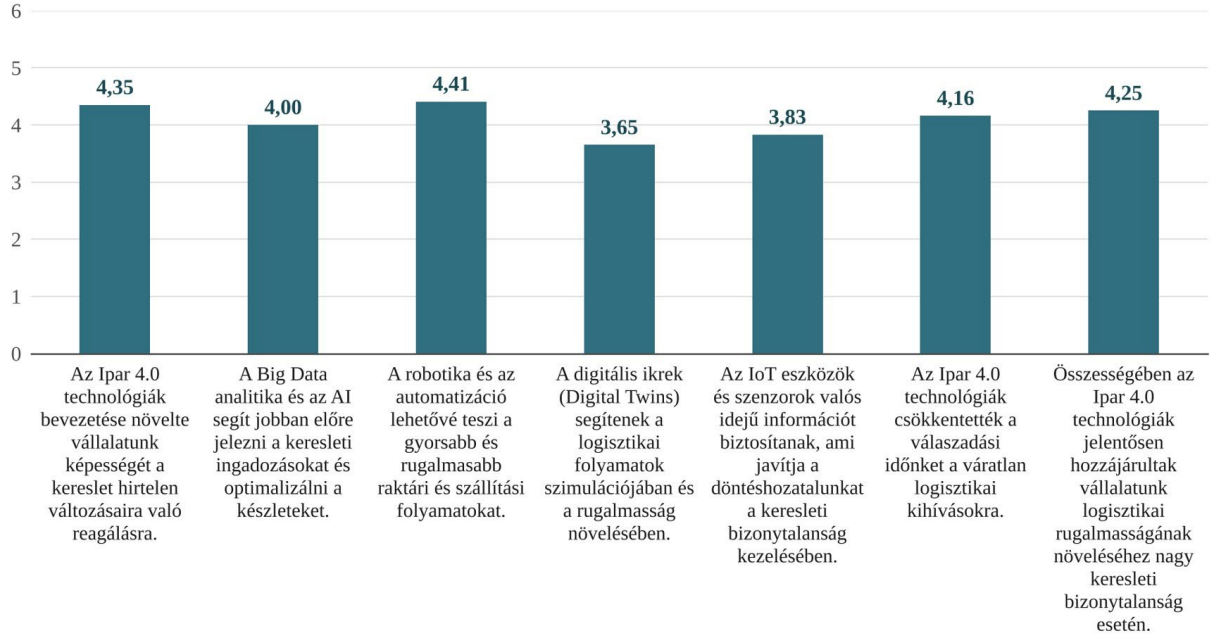
A válaszokból látható, hogy az Ipar 4.0 technológiái - amennyiben jelen vannak a vállalat működésében - jelentős mértékben hozzájárulnak a kereslet és kínálat változásaira való gyorsabb reagáláshoz. Emellett elősegítik a raktári folyamatok hatékonyabb és rugalmasabb kialakítását, valamint az átfutási idők csökkentését.



	Az Ipar 4.0 technológiák bevezetése növelte vállalatunk képességét a kereslet hirtelen változásaira való reagálásra.	A Big Data analitika és az AI segít jobban előre jelezni a keresleti ingadozásokat és optimalizálni a készleteket.	A robotika és az automatizáció lehetővé teszi a gyorsabb és rugalmasabb raktári és szállítási folyamatokat.	A digitális ikrek (Digital Twins) segítenek a logisztikai folyamatok szimulációjában és a rugalmasság növelésében.	Az IoT eszközök és szenzorok valós idejű információt biztosítanak, ami javítja a döntéshozatalunkat a keresleti bizonytalanság kezelésében.	Az Ipar 4.0 technológiák csökkentették a válaszadási időnket a váratlan logisztikai kihívásokra.	Összességében az Ipar 4.0 technológiák jelentősen hozzájárultak vállalatunk logisztikai rugalmasságának növeléséhez nagy keresleti bizonytalanság esetén.
N/A	4	9	5	10	5	2	3
1	1	1	1	1	2	0	0
2	1	2	2	4	1	3	2
3	2	5	1	4	5	3	6
4	7	2	5	2	7	9	4
5	9	4	9	3	4	7	8
6	3	4	4	3	3	3	4

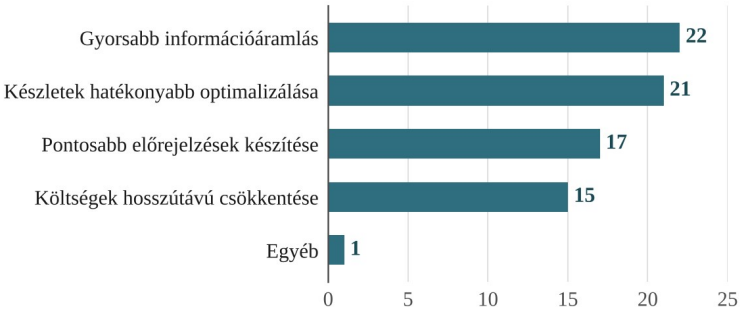
17. ábra: Az Ipar 4.0 technológiák logisztikai rugalmasságra gyakorolt hatásának értékelése nagy keresleti bizonytalanság mellett

Összességében ezek a technológiák a logisztikai rugalmasság növelésén keresztül javítják a vállalatok keresleti bizonytalansághoz való alkalmazkodóképességét, ezáltal elősegítve a változó piaci körülményekhez való gyorsabb és hatékonyabb alkalmazkodást.
A 18. ábrán az egyes szempontokra adott válaszok átlagértéke látható.

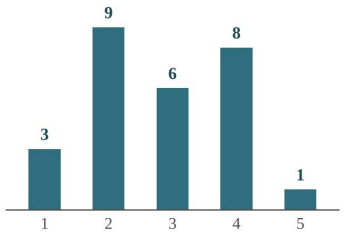


18. ábra: Az Ipar 4.0 technológiák befolyásolásának értékelésére adott válaszok átlagos értéke

A 18. ábrán látható, hogy az Ipar 4.0 technológiai eszközei leginkább a robotika és az automatizáció területén tetten érhetők, ezek azok az eszközök, amelyek leginkább alkalmazva vannak. Kevésbé jellemző a digitális ikrek, illetve az IoT alkalmazása, ugyanakkor összességében pozitívan értékelik ezen eszközöknek a logisztikai rugalmasság növeléséhez való hozzájárulását, és ezzel együtt a keresleti bizonytalanság kezelésében. Az utolsó előtti kérdésben arra kerestem a választ, hogy milyen konkrét előnyöket lát a válaszadó az Ipar 4.0 technológiákban a keresleti bizonytalanság kezelésére vonatkozóan. (19/a és b ábra)



19/a ábra: Az Ipar 4.0 technológiák előnyei a keresleti bizonytalanság kezelésére vonatkozóan



19/b ábra: Válaszok száma

A válaszadók a legnagyobb előnyt a gyorsabb információáramlásban látják, majd ezt követi a készletek hatékonyabb optimalizálása. A válaszok száma szempontjából ugyanakkor elmondható, hogy a válaszadók több mint háromnegyede egy előnynél több megoldást lát, amelyből arra következtethetünk, hogy az eszközök együttes alkalmazása segíthet a keresleti bizonytalanság kezelésében. Az információáramlás ilyen szerepe a logisztikai folyamatok és az ellátási lánc szereplői közötti összehangolás szempontjából értelmezhető [P49]. Az Ipar 4.0 logisztikai alkalmazásait áttekintő szakirodalom ugyancsak az információk láthatóságát és a rendszerek összekapcsoltságát emeli ki a lehetséges előnyök között [P45].

A logisztikai rugalmasság vizsgálatának zárásaként nyitott kérdésben kérdeztem a válaszadókat a logisztikai rugalmasság jelentőségéről és alkalmazhatóságáról a gyártási és logisztikai szolgáltatási folyamatokban. A válaszokat tartalomelemzéssel dolgoztam fel: az egyes válaszokban szereplő állításokat tematikus kategóriákba soroltam, majd a kategóriákat SWOT-keretbe rendeztem. A vállalaton belüli, a vállalat által befolyásolható jellemzőket az erősségek és a gyengeségek, a külső környezetből eredő tényezőket a lehetőségek és a veszélyek közé soroltam. A belső jellemzők erősségek és gyengeségek, a külső környezeti tényezők lehetőségek és veszélyek szerinti elkülönítése a SWOT szemléletéhez kapcsolódik [P50]. A kódolást egyedül végeztem, ami a besorolás szubjektivitásának korlátját jelenti. (4. táblázat).

A logisztikai rugalmasság SWOT-analízise rávilágít arra, hogy a vállalatok számára a gyors alkalmazkodóképesség jelentős versenyelőnyt jelent. Az erősségek közé tartozik a vevői igényekre való gyors reagálás, a külső hatások kezelése, valamint a költséghatékonyság és vevői elégedettség növekedése. Ugyanakkor a rugalmasság magas információigénye és a rendszer komplexitása kihívást jelenthet. A lehetőségek között szerepel a fenntartható logisztika, az automatizálás, valamint új piacok elérése. A veszélyek közé tartoznak az ellátási lánc zavarai, a technológiai függőség és a fejlesztések elmaradása.

Az empirikus vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy a logisztikai rugalmasság a vizsgált vállalatok működésében meghatározó szerepet tölt be. A kérdőíves felmérés rámutatott a rugalmasság legfontosabb dimenzióira, a fejlesztést akadályozó tényezőkre, valamint a vállalatok által érzékelt stratégiai előnyökre és kihívásokra.

SWOT	
Erősség	**Gyengeség**
- Vevői igényekre gyors reagálás - Külső nem várt hatásokra gyors reagálás - Versenyelőny a versenytársakkal szemben - A költségcsökkentés és profitabilitás növekedése mellett a vevői elégedettség is nő	- Nagyon nagyfokú információigény (gyártási terv, valós idejű készletadatok, stb.) - Komplexitás növekedése, amely nehezíti az irányítást és az átláthatóságot
Lehetőség	**Veszély**
- Gazdaságosság segítése, likviditási lehetőség - Fenntartható logisztikai rendszerek kialakítása - Automatizálás és mesterséges intelligencia alkalmazása a logisztikai folyamatok optimalizálására - Új piacok elérése rugalmas szállítási és ellátási láncok révén	- Ellátási lánc zavarai (pl. geopolitikai konfliktusok, járványok) - Technológiai fejlesztések hiánya, technológiai függőség, valós idejű információ szükségessége

4. táblázat: A logisztikai rugalmasság SWOT-analízise

6.4. Összegzés és tézis

A logisztikai rugalmasság a vállalatok azon képességét jelenti, hogy gyorsan és hatékonyan tudnak alkalmazkodni a változó piaci igényekhez, körülményekhez és kihívásokhoz anélkül, hogy az üzleti folyamatok vagy a szolgáltatás minősége sérülne. A kérdőív elemzéséből kiderült, hogy a hazai vállalatok különböző mértékben rendelkeznek ezzel a képességgel, leginkább a szállítási és útvonalrugalmasság terén mutatnak erősséget. Ugyanakkor a volumenrugalmasság, vagyis a kereslet hirtelen változásaira való reagálás még fejlesztésre szorul. Bevezetését leginkább az erőforráshiány akadályozza - legyen szó anyagi, humán vagy technológiai tényezőkről. A keresleti bizonytalanság kezelésére a vállalatok elsősorban rugalmas beszállítói kapcsolatokra és biztonsági készletekre támaszkodnak. Az Ipar 4.0 technológiák - például a robotika, automatizáció, IoT - pozitív hatással vannak a logisztikai rugalmasságra, különösen a gyorsabb reakcióidő és a hatékonyabb készletkezelés terén. A válaszadók többsége szerint ezek az eszközök együttes alkalmazása segíthet a keresleti bizonytalanság kezelésében. A SWOT-analízis alapján a logisztikai rugalmasság jelentős versenyelőnyt biztosíthat, de magas információigénye és komplexitása kihívásokat is rejt. A jövőbeni lehetőségek között szerepel a fenntartható logisztika és az új piacok elérése, míg a veszélyek között az ellátási lánc zavarai és a technológiai lemaradás szerepelnek.
A fejezetben bemutatott empirikus vizsgálat eredményei és azok összegző értelmezése alapján a következő tudományos tézist fogalmazom meg:

I. TÉZIS - A logisztikai rugalmasság vállalati jellemzői
A hazai és nemzetközi szakirodalom tanulmányozása, valamint a magyarországi iparvállalatok körében végzett empirikus vizsgálat alapján feltártam a logisztikai rugalmasság meghatározó dimenzióit, valamint a keresleti bizonytalansághoz való alkalmazkodást támogató és korlátozó tényezőket. Megállapítottam, hogy a vizsgált vállalati mintában a logisztikai rugalmasság elsősorban a szállítási rugalmasság és a fennakadások esetén alkalmazható alternatív útvonalak és megoldások területén érvényesül, míg a hirtelen keresleti volumenváltozásokhoz való alkalmazkodás korlátozottabb, ugyanakkor a digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák szerepe a gyorsabb információáramlás, a rövidebb reakcióidő és a hatékonyabb készletkezelés támogatásában mutatkozik meg. [S2, S4, S6, S7]

7. A HALASZTÁSI STRATÉGIA SZEREPE A MODERN LOGISZTIKÁBAN

A logisztikai rugalmasság növelése napjaink egyik legfontosabb versenyképességi tényezője, különösen a kereslet gyors változásával és az ellátási láncokat érő egyre gyakoribb zavarokkal jellemezhető gazdasági környezetben. Az előző fejezet rámutatott arra, hogy az Ipar 4.0 technológiák jelentős szerepet tölthetnek be a vállalatok alkalmazkodóképességének fejlesztésében, azonban a technológiai fejlesztések önmagukban nem elegendőek. A versenyképesség fenntartásához olyan logisztikai stratégiák alkalmazása is szükséges, amelyek képesek mérsékelni a keresleti bizonytalanságból eredő kockázatokat.

A keresleti bizonytalanság kezelésének egyik lehetséges stratégiai eszköze a halasztás, amely egyes termelési vagy logisztikai műveletek végrehajtását későbbre helyezi, hogy azok pontosabb keresleti információra épülhessenek [P30, P42]. Előnyei a választott működési és kockázatkezelési megoldások feltételeitől is függenek [P43].

E megközelítés egyik legjelentősebb eszköze a halasztási (postponement) stratégia, amely lehetővé teszi, hogy a termék végleges kialakításával, összeszerelésével, csomagolásával vagy egyes logisztikai műveleteivel kapcsolatos döntések csak akkor szülessenek meg, amikor a piaci igények már pontosabban ismertek. A stratégia alkalmazása egyszerre járulhat hozzá a készletszintek optimalizálásához, a logisztikai rugalmasság növeléséhez és a vevői igények magasabb szintű kielégítéséhez.

Ezen fejezet célja a halasztási stratégia hazai alkalmazásának vizsgálata, valamint annak feltárása, hogy a vállalatok digitális fejlettsége és az Ipar 4.0 technológiák alkalmazása milyen kapcsolatban áll e stratégia gyakorlati megvalósításával. A fejezet bemutatja a kutatás célját és indokoltságát, ismerteti az alkalmazott módszertant, elemzi a kérdőíves felmérés eredményeit, majd ezek alapján megfogalmazza a kutatás legfontosabb téziseit.

7.1. A halasztási stratégia vizsgálatának célja és indokoltsága

A logisztikai és ellátási lánc menedzsment területén a keresleti bizonytalanság kezelésére alkalmazható stratégiai megoldások egyre nagyobb jelentőséggel bírnak. A globalizált piacok, a rövidülő termékéletciklusok, valamint az ellátási láncokat érő egyre gyakoribb zavarok szükségessé teszik olyan megközelítések alkalmazását, amelyek képesek növelni a vállalatok alkalmazkodóképességét és logisztikai rugalmasságát. E kihívások kezelésének egyik hatékony eszköze a halasztási (postponement) stratégia, amely lehetővé teszi, hogy a termék végleges kialakításával vagy egyes logisztikai műveletekkel kapcsolatos döntések csak akkor szülessenek meg, amikor a piaci igények már nagyobb pontossággal ismertek.

A halasztási stratégia elméleti alapjai, típusai és alkalmazási lehetőségei a nemzetközi szakirodalomban jól megalapozott kutatási területnek tekinthetők. A halasztás és az előzetes elköteleződés elméleti kapcsolatának korai tárgyalása Bucklin munkájában is megjelenik [P41]. A kutatások rámutatnak arra, hogy alkalmazása hozzájárulhat a készletköltségek csökkentéséhez, a logisztikai rugalmasság növeléséhez, valamint a vevői igények magasabb szintű kielégítéséhez. Ugyanakkor a digitalizációs érettség, az Ipar 4.0 technológiák alkalmazása és a halasztási stratégia közötti összefüggések empirikus vizsgálata - különösen a hazai iparvállalatok körében - továbbra is olyan kutatási terület, amely további vizsgálatokat indokol.

Jelen kutatás célja annak feltárása, hogy a hazai iparvállalatok körében milyen összefüggés mutatható ki a halasztási stratégia alkalmazása, a vállalatok digitális fejlettsége és az Ipar 4.0 technológiák alkalmazása között. A vizsgálat emellett arra is választ keres, hogy a halasztási

stratégia alkalmazása milyen kapcsolatban áll a vállalatok logisztikai rugalmasságával, valamint a kereslet változásaihoz való alkalmazkodási képességével.
A kutatás indokoltságát egyrészt a halasztási stratégia és a digitalizáció kapcsolatának hazai empirikus vizsgálata iránti igény, másrészt a vállalatok alkalmazkodóképességének és logisztikai rugalmasságának növekvő jelentősége adja. A kutatás eredményei hozzájárulhatnak a halasztási stratégia hazai alkalmazási gyakorlatának mélyebb megértéséhez, valamint a digitalizáció és a logisztikai stratégiai döntések közötti összefüggések feltárásához.

7.2. A halasztási stratégia vizsgálatának módszertana

Ahogy a 6.2. fejezetben bemutatásra került, a kutatás 27 magyar iparvállalat logisztikai vezetőinek kérdőíves válaszain alapul, ugyanezen adatfelvétel postponementre és digitalizációra vonatkozó eredményeit az [S2] cikkben ismertettem. A modell középpontjában a vállalati jellemzők (méret, iparági sajátosságok) állnak, mivel ezek alapvetően befolyásolják a logisztikai döntések és stratégiák jellegét. A vállalati háttér meghatározza, hogy milyen formában és milyen célok mentén valósul meg a halasztási stratégia, legyen szó a gyártás, csomagolás, szállítás vagy végszerelés késleltetéséről. A halasztási stratégia kialakításakor a termék és a folyamat sajátosságait, a végrehajtáshoz szükséges erőforrásokat, valamint a vevői kiszolgálás követelményeit is figyelembe kell venni [P42]. A halasztott műveletek megválasztásánál azok végrehajtási időpontja és az ellátási láncon belüli helye együttesen is jelentős lehet [P51]. A modell másik kulcseleme a digitalizációs érettség és az Ipar 4.0 technológiák alkalmazásának szintje. Ezek a tényezők nemcsak a halasztási stratégia technikai megvalósíthatóságát befolyásolják, hanem annak rugalmasságát, hatékonyságát és reakcióképességét is. A kutatás célja e tényezők közötti kapcsolatok és statisztikai összefüggések feltárása, különös tekintettel arra, hogy a vállalati jellemzők és a digitalizációs fejlettség miként befolyásolják a halasztási stratégia alkalmazásának valószínűségét.
A statisztikai elemzések három szinten valósultak meg:

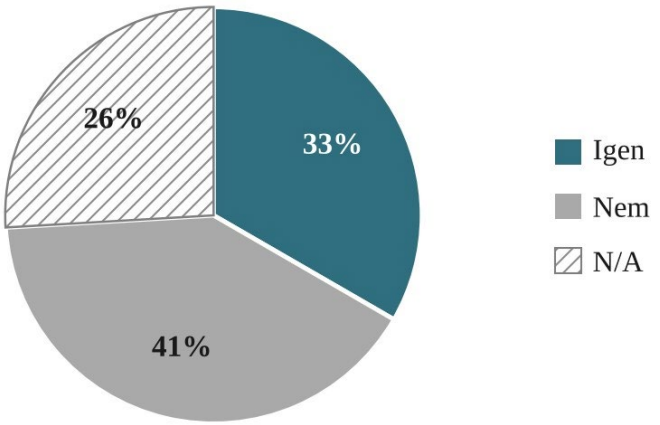
1. Leíró statisztika: a válaszadók jellemzőinek, valamint a főbb változók gyakorisági eloszlásának bemutatása.
2. Kereszttábla-elemzés (Pivot táblák): a halasztási stratégia alkalmazása és a vállalati méret, valamint a digitalizációs fejlettség közötti összefüggések vizsgálata [P52].
3. Khí-négyzet próba (χ^2): a kategóriaváltozók közötti kapcsolat vizsgálata, a próba alkalmazási feltételeinek figyelembevételével [P53].

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \tag{2}$$

ahol O_i a megfigyelt gyakoriság, E_i pedig a várható gyakoriság függetlenség esetén. A próba célja annak meghatározása volt, hogy a halasztási stratégia alkalmazása és a digitalizációs tényezők (Big Data, mesterséges intelligencia, RFID, IoT stb.) között fennáll-e statisztikailag szignifikáns kapcsolat. A szignifikancia szintjét p = 0,05 értéken határoztam meg.

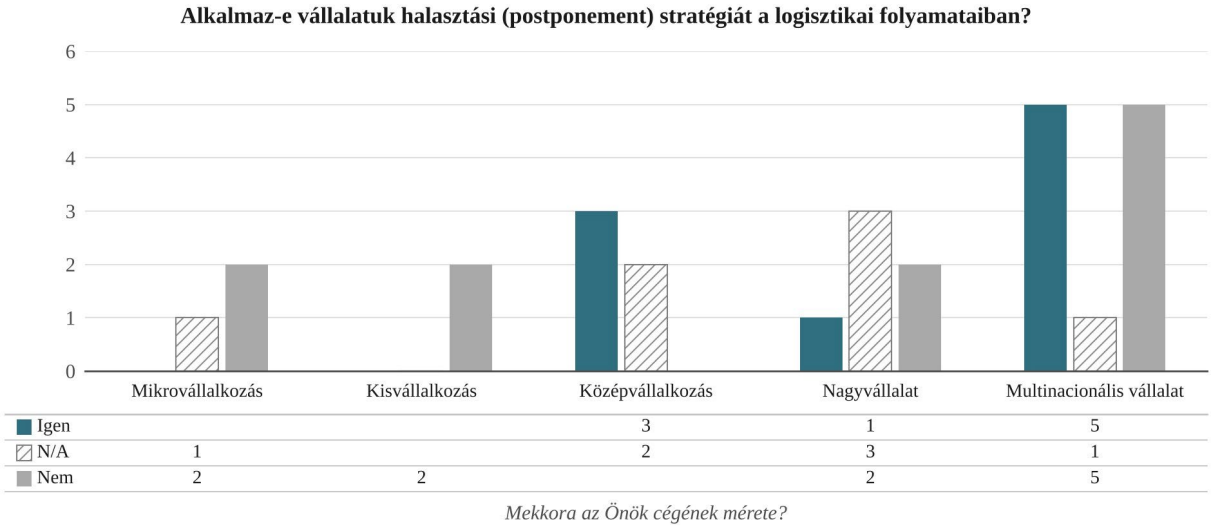
7.3. A halasztási stratégia vizsgálatának eredményei

A kérdőíves vizsgálat postponement részére vonatkozó kérdéseinek elsődleges célja az volt, hogy feltárja, hogy a magyar iparvállalatok milyen mértékben alkalmazzák a halasztási (postponement) stratégiát logisztikai folyamataikban. (20. ábra)



20. ábra: A halasztási stratégia alkalmazása a vállalatoknál

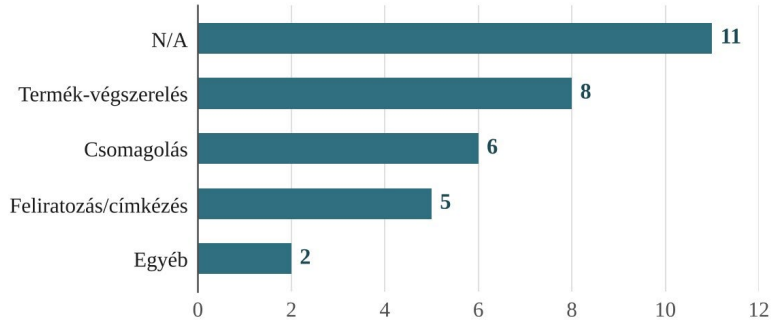
A diagramon látható, hogy a válaszadóknak körülbelül az egyharmada alkalmazza ezt a stratégiát, melyből arra következtethetünk, hogy mindez kevéssé elterjedt hazánkban, illetve olyan gyártási és vevő-kiszolgálási körülményeik vannak, amik nem teszik indokolttá a stratégia bevezetését [S2]. A kérdőív válaszadói között a multinacionális cégek domináltak, mindezek a válaszadók közel felét teszik ki. Emellett jelentős számban képviseltették magukat nagyvállalatok és középvállalkozások is, ami azt mutatja, hogy a felmérés elsősorban olyan szereplők körében került kitöltésre, akik összetett logisztikai rendszerekkel és szélesebb körű digitalizációs lehetőségekkel rendelkeznek. Bár kisebb számban, de mikro- és kisvállalkozások is kitöltötték a kérdőívet. Mindebből kiindulva a halasztásos stratégiát vizsgálva a Pivot tábla segítségével megvizsgáltam, hogy a cég mérete mennyire függ össze azzal, hogy alkalmazzák-e a stratégiát. (21. ábra)



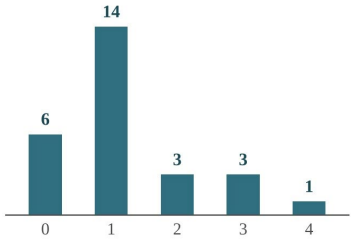
21. ábra: A halasztásos stratégia alkalmazása a vállalatok mérete szempontjából

A válaszokból az látszódik, hogy a stratégiát leginkább közép- és multinacionális vállalkozások alkalmazzák, amiből arra lehet következtetni, hogy a vállalatok méretével összefüggésben lehet az ilyen jellegű stratégia alkalmazása [S2]. A kisebb vállalatok körében ritkább a halasztásos stratégia alkalmazása, ami részben az informatikai infrastruktúra és a digitalizációs erőforrások korlátozott elérhetőségével magyarázható. A következő kérdésben az előzőekhez kapcsolódva arra kerestem a választ, hogy ha az adott vállalatnál alkalmazzák a halasztásos stratégiát, akkor

mely területhez kapcsolódik mindaz. A válaszadók több lehetőséget is választhattak, így a 22/a ábra válaszai mellett a 22/b ábrán a válaszok száma is látható.



22/a ábra: A halasztási stratégia felhasználási területei

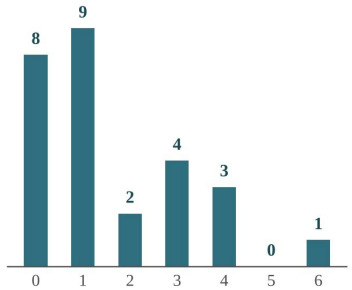


22/b ábra: Válaszok száma

Azok közül, akik alkalmazzák a logisztikai folyamataik optimalizálása kapcsán ezt a megoldást, a diagramból látható, hogy leginkább a *'Termék-végszerelésnél'* jelenik meg, majd ezt követi a *'Csomagolás'* [S2]. A végszerelés és a csomagolás késleltetése a termék végső differenciálását és vevőspecifikus kialakítását támogató postponementmegoldások közé illeszthető [P30], [P42]. A végrehajtási hely megválasztása különösen a több piacot kiszolgáló downstream hálózatokban válhat fontos tervezési kérdéssé [P51]. Az egyéb kategóriában befektetés, új szolgáltatási ágak beindítása, valamint a gyorsan előállítható belső gyártású komponensek gyártása szerepelt. A területek mellett az alkalmazás célja is meg lett kérdezve, melynek eredménye a 23/a és b ábrán látható.



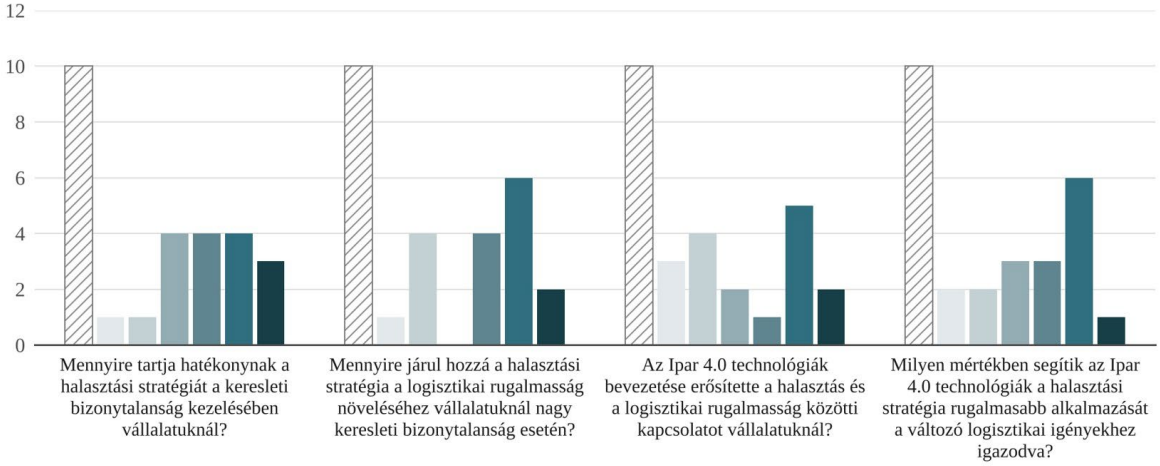
23/a ábra: A halasztási stratégia felhasználási céljai



23/b ábra: Válaszok száma

A 23/a ábrán látható, hogy három opció is holtversenyben van egymással, ami a *'Készletek csökkentése'*, *'Kereslet ingadozásainak kezelése'* és az *'Ügyfélspecifikus igények kielégítése'*. Meglepő módon a *'Logisztikai költségek csökkentése'* az utolsó helyre került, amelyből arra lehet következtetni, hogy a Postponement stratégia alkalmazása nem a költségek csökkentése szempontjából fontos, sokkal inkább a kiszámítható, megbízható folyamatok működtetése szempontjából. A halasztás értékelésekor a készlethez kapcsolódó kockázat csökkenését a későbbi teljesítés kapacitás-, koordinációs és kiszolgálási követelményeivel együtt indokolt mérlegelni [P42]. Az alkalmazási területeket vizsgálva a halasztás leggyakrabban a termék-végszerelés és a csomagolás fázisában jelenik meg. Ezek azok a pontok, ahol a keresletinformációkhoz igazodó késleltetés közvetlenül növeli a rugalmasságot. A válaszadók szerint a halasztási stratégia leggyakrabban megjelölt céljai a készletszint csökkentése, a keresletingadozások kezelése és az ügyféligények pontosabb kielégítése voltak, amelyek egyaránt nyolc jelölést kaptak, míg a logisztikai költségek csökkentése kevésbé került előtérbe.

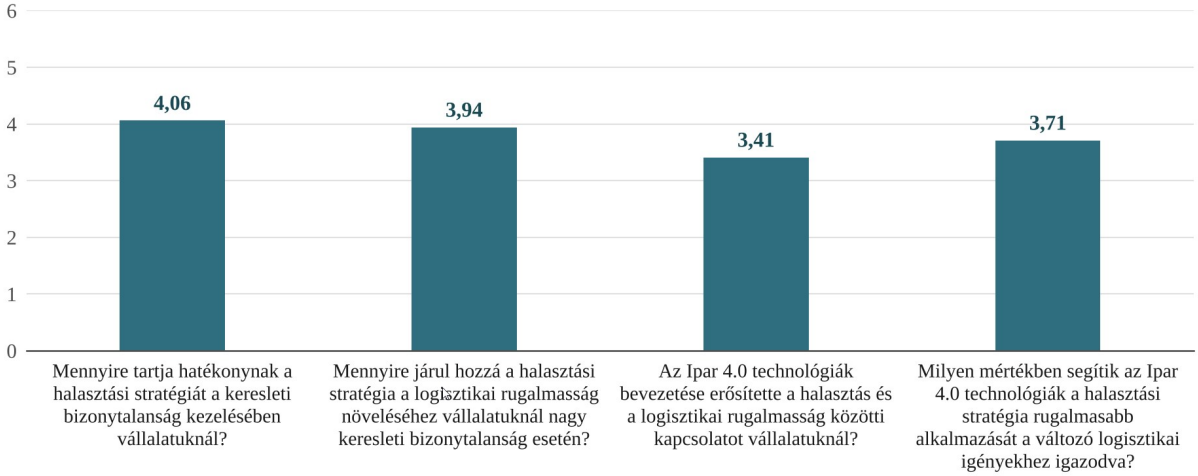
A témakör utolsó előtti kérdéscsoportjában az egyes állításokat 1-től 6-ig terjedő skálán értékelhették a válaszadók. Ahol az 1 azt jelentette, hogy egyáltalán nem jellemző az adott vállalatra a kérdés, míg a 6 teljes mértékben. (24. ábra)



	Mennyire tartja hatékonynak a halasztási stratégiát a keresleti bizonytalanság kezelésében vállalatuknál?	Mennyire járul hozzá a halasztási stratégia a logisztikai rugalmasság növeléséhez vállalatuknál nagy keresleti bizonytalanság esetén?	Az Ipar 4.0 technológiák bevezetése erősítette a halasztás és a logisztikai rugalmasság közötti kapcsolatot vállalatuknál?	Milyen mértékben segítik az Ipar 4.0 technológiák a halasztási stratégia rugalmasabb alkalmazását a változó logisztikai igényekhez igazodva?
N/A	10	10	10	10
1	1	1	3	2
2	1	4	4	2
3	4	0	2	3
4	4	4	1	3
5	4	6	5	6
6	3	2	2	1

24. ábra: A halasztási stratégia értékelése az alkalmazási szempontok szerint

A kérdések leginkább az alkalmazási szempontokra irányultak, mint például, hogy a stratégia segítségével mennyire tudja az adott vállalat a keresleti bizonytalanságot kezelni, mennyire segíti a logisztikai rugalmasság növelését, valamint hogyan kapcsolódik az Ipar 4.0 adta technológiák alkalmazási lehetőségéhez. A diagramon látható, hogy amennyiben alkalmazva van a cégnél a Postponement, a válaszadók óvatosan kezelik a kérdésekre adott válaszukat, találnak összefüggést az alkalmazási szempontok szerint, segítheti őket az Ipar 4.0 technológiák bevezetése, de a stratégia nem feltétlenül érezteti a hatását [S2]. Ha az átlagos értékeket vesszük figyelembe a 25. ábrán, akkor hasonló következtetés vonható le.



25. ábra: A halasztási stratégia alkalmazási szempontjaira adott átlagos értékek

A 25. ábrán látható, hogy a kitöltők inkább jobban érzik a Postponement stratégia hatását a kiválasztott szempontok szerint, de viszonylag messze vannak az átlagos értékek a *'Teljes mértékben'* szélsőértéktől. A válaszadói értékelések szakirodalmi értelmezéséhez kapcsolódik,

hogy kiskereskedelmi környezetben a halasztás és a logisztikai rugalmasság összefüggése a logisztikai integráció és a keresleti bizonytalanság szintje szerint is eltérhet [P2]. Tonsi és munkatársai az informatikai képességek, a halasztás és az ellátási lánc életképességének kapcsolatát vizsgálták, a piacorientáció és a keresleti bizonytalanság szerepét is figyelembe véve [P3]. Ezek az eltérő vállalati körben kapott eredmények összehasonlítási alapot adnak, de a jelen minta kapcsolatainak külön statisztikai vizsgálatát nem helyettesítik.
A halasztási stratégia témakör utolsó, nyitott kérdésében arra kértem a válaszadókat, hogy fejtsék ki véleményüket a halasztási stratégia jelentőségéről és alkalmazhatóságáról a gyártási és a logisztikai szolgáltatások területén. A válaszokat a 6.3. alfejezetben ismertetett módon kódoltam és rendeztem SWOT-keretbe.

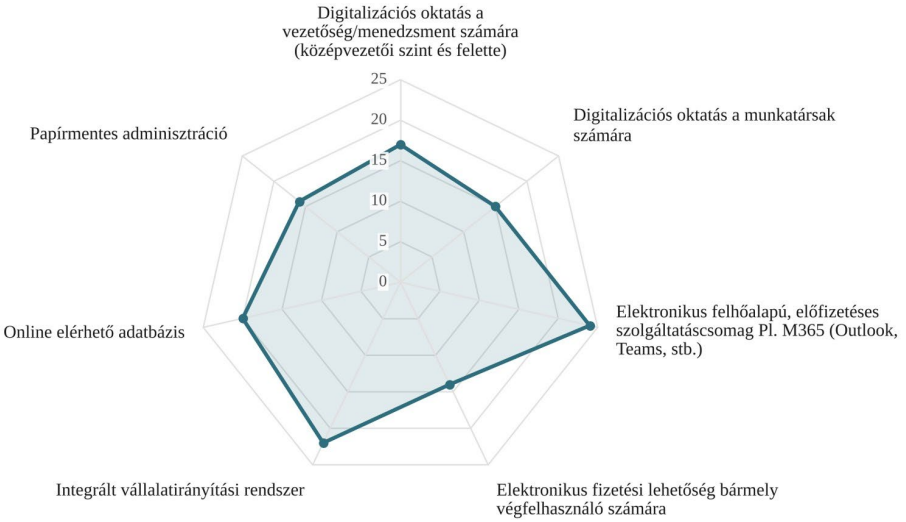
SWOT	
Erősség	**Gyengeség**
- Készletcsökkentés - Alacsonyabb raktári költségek - Rugalmas reagálás a keresletváltozásra - Kiválóan alkalmazható high mix / low volume környezetben, mint elhalasztott „konfekcionálási” eszköz - Testreszabhatóság növelése: lehetővé teszi az utolsó pillanatban történő konfigurációt	- Kevéssé alkalmazott/ismert módszer a gyakorlatban - Technológiai és informatikai igény/beruházási igény - Hosszabb átfutási idő - Komplexitás növekedése: a késleltetett döntések bonyolultabbá tehetik a folyamatokat - Magasabb koordinációs igény: több részleg és partner összehangolása szükséges
Lehetőség	**Veszély**
- Digitális technológiák integrálása (pl. új ERP rendszer, Ipar 4.0 eszközök) - Fenntarthatóság elősegítése: kevesebb hulladék, túltermelés - AI és prediktív analitika alkalmazása a kereslet pontosabb előrejelzésére. - Többcsatornás értékesítés támogatása: különböző piacokra való gyors reagálás	- Túl alacsony készletek tartása - Kitettség a környezeti hatásoknak, beszállítói problémák - Vevői igények gyors kielégítése / gyorsaság hiánya - Technológiai függőség az IT rendszerektől

5. táblázat: A Postponement stratégia SWOT-analízise

Az 5. táblázatból látható, hogy a SWOT-analízis szerint a Postponement stratégia erősségei közé tartozik a készletcsökkentés, az alacsonyabb raktározási költségek, valamint a keresletváltozásokra való rugalmas reagálás. Különösen jól alkalmazható olyan környezetben, ahol sokféle termék kis mennyiségben készül (high mix-low volume). Gyengeségei közé sorolható, hogy kevéssé ismert és alkalmazott módszer, technológiai beruházásokat igényel, és hosszabb átfutási idővel járhat. A lehetőségek között szerepel a digitális technológiák integrálása és a fenntarthatóság elősegítése, míg a veszélyek között a túl alacsony készletszint, a környezeti és beszállítói kockázatok, valamint a gyors vevői kiszolgálás hiánya említhető.

Összefüggésvizsgálat a Postponement alkalmazása és a vállalatok digitális képességei között
A megkérdezett vállalatok többsége (63%) arról számolt be, hogy az elmúlt évek jelentős gazdasági és geopolitikai eseményei (COVID-19 járvány, orosz-ukrán konfliktus, valamint a magas infláció) nagymértékben kényszerítették a hosszú távú terveik újragondolására. Ugyanakkor ez jelzi, hogy a stratégiai szintű üzleti előrejelzések és célkitűzések már nem hagyhatják figyelmen kívül a globális bizonytalansági tényezőket. A válaszokból leszűrhető, hogy a digitalizáció már nem opcionális lehetőség, hanem stratégiai követelmény a vállalatok többsége számára. Az, hogy a cégek több mint 70%-a jelenleg is dolgozik digitalizációs stratégiájának megvalósításán, azt jelzi, hogy az ipari digitalizáció áttörési szakaszban van -

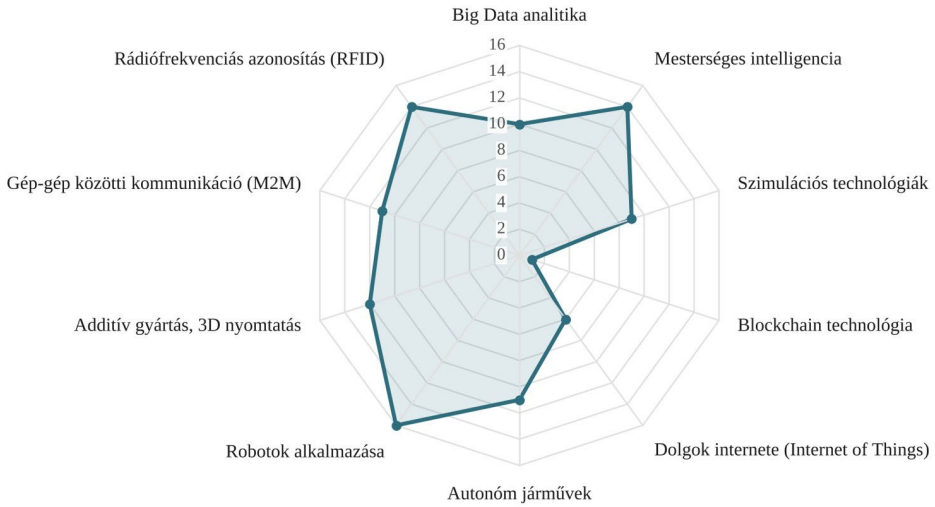
különösen azoknál a vállalatoknál, amelyek komplex logisztikai vagy gyártási folyamatokat működtetnek. A már megvalósított stratégia (14,8%) aránya viszonylag alacsony, ami azt mutatja, hogy teljes körű digitális transzformációt egyelőre csak a legérettebb, leginkább felkészült vállalatok tudtak végrehajtani. A "*nincs stratégia és nincs is tervben*" típusú válaszok (3,7%) aránya marginalizálódott, ami alátámasztja a nemzetközi trendeket is. A vállalatoknál megjelenő digitalizációs eszközök, képességek alakulását a 26. ábra mutatja.



26. ábra: A kutatásban részt vevő vállalatok digitális eszközei, képességei

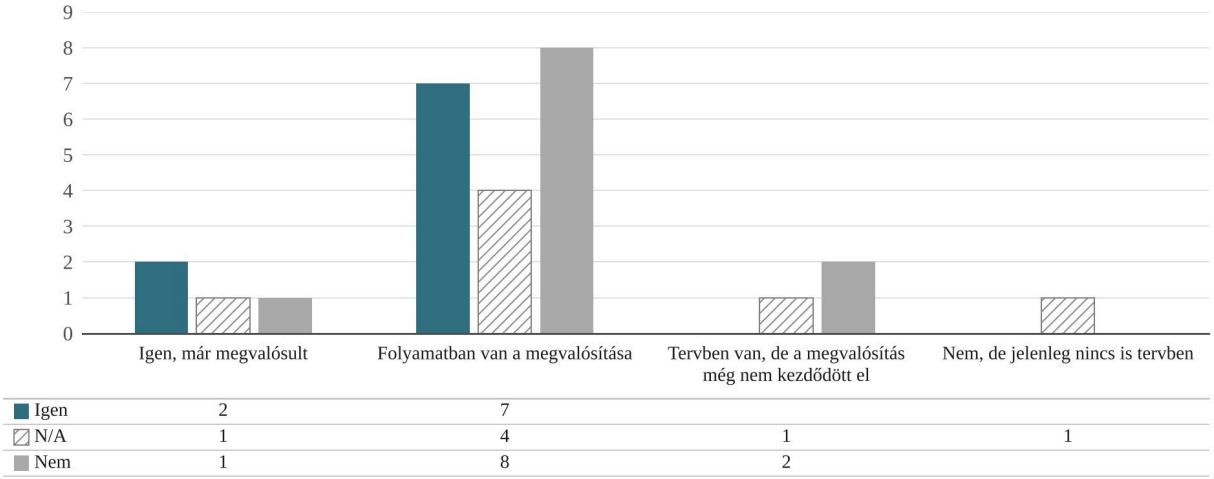
A 26. ábra alapján a vizsgált vállalatok digitális eszközellátottsága és digitalizációs képességei eltérő képet mutatnak. A leggyakrabban alkalmazott megoldások közé tartoznak az elektronikus felhőalapú szolgáltatások, az integrált vállalatirányítási rendszerek és az online elérhető adatbázisok. A digitalizációs oktatás mind vezetői, mind munkatársi szinten megjelenik, míg az elektronikus fizetési lehetőségek alkalmazása kevésbé elterjedt. Az eredmények alapján a vizsgált vállalatok digitalizációja több működési területre is kiterjed, ugyanakkor az egyes megoldások alkalmazási gyakoriságában jelentős különbségek figyelhetők meg.

A következő kérdés kifejezetten az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó digitális eszközök és képességek meglétét vizsgálta, amely összefoglalása a 27. ábrán látható.



27. ábra: A kutatásban résztvevő vállalatok digitális eszközei, képességei az Ipar 4.0-hoz kapcsolódóan

A 27. ábra alapján az Ipar 4.0 technológiák alkalmazási gyakorisága jelentős eltéréseket mutat a vizsgált vállalatok körében. A leggyakrabban alkalmazott megoldások közé tartozik a robotika, a mesterséges intelligencia és a rádiófrekvenciás azonosítás (RFID).
A Big Data analitika, a gépek közötti kommunikáció (M2M), az additív gyártás és a szimulációs technológiák szintén megjelennek a vállalati gyakorlatban, de eltérő gyakorisággal. A blockchain technológia alkalmazása a vizsgált megoldások között különösen alacsony értéket mutat. Az eredmények arra utalnak, hogy az Ipar 4.0 technológiák elterjedtsége a vizsgált vállalati mintában nem egyenletes, és a különböző technológiai megoldások bevezetése eltérő szinten valósult meg.
Mindebből kiindulva a következőkben azt vizsgáltam, hogy milyen arányban vannak azok a vállalatok, akik alkalmazzák a Postponement stratégiát abból a szempontból, hogy a digitalizáció szempontjából mennyire tudatosak. (28. ábra)



Igen	2	7		
N/A	1	4	1	1
Nem	1	8	2	

28. ábra: A vállalatok digitális stratégiája és a halasztásos stratégia alkalmazása közötti összefüggés vizsgálata

A válaszokból az látható, hogy azok, akik alkalmazzák a stratégiát, náluk van már megvalósult digitális stratégia is. Ugyanakkor a két stratégia megvalósítása nem feltétlenül függ össze egymással, mivel azt láthatjuk a válaszokból, hogy a cégek közel egyharmadánál jelenleg is folyamatban van a digitalizációs stratégia megvalósítása, miközben ők nem alkalmazzák a Postponement stratégiáját. A kérdőíves elemzésből kiderült, hogy a Postponement stratégiát alkalmazó vállalatok körében az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó eszközök alkalmazása eléggé megosztó. Azoknál a vállalatoknál, ahol jelen van a stratégia, a legjellemzőbb eszközök a mesterséges intelligencia, a robotok, valamint, az RFID technika alkalmazása. Összességében elmondható, hogy a vállalatok nagyon vegyes képet mutatnak abban a tekintetben, hogy alkalmazzák-e a halasztásos technológiát, és emellett milyen, az Ipar 4.0-hoz is köthető digitális képességeik vannak.
Végül a vizsgált elemek között a khí négyzet próba lett elvégezve annak érdekében, hogy meg legyen vizsgálva, hogy a stratégia alkalmazása és a digitális motívumok között van-e szignifikáns összefüggés (6. táblázat). A 6. táblázatban közölt khí-négyzet próbák eredményei alapján a halasztási stratégia alkalmazása és az egyes Ipar 4.0 technológiák megléte között a vizsgált vállalati mintában nem volt kimutatható statisztikailag szignifikáns kapcsolat. A kis mintanagyság (27 vállalat) ugyanakkor korlátozhatja a statisztikai vizsgálatok megbízhatóságát és a gyengébb összefüggések kimutatásának lehetőségét. A nem szignifikáns eredmények ezért nem bizonyítják a kapcsolatok hiányát.

Tesztelt paraméterek	Szabadságfok	khí-négyzet	Szignifikáns?
Postponement - Big Data analitika	4	0,576	nem
Postponement - Mesterséges intelligencia	4	0,233	nem
Postponement - Szimulációs technológiák	4	0,367	nem
Postponement - Blockchain technológia	4	0,687	nem
Postponement - Internet of Things	4	0,076	nem
Postponement - Autonóm járművek	4	0,962	nem
Postponement - Robotok alkalmazása	4	0,717	nem
Postponement - Additív gyártás, 3D nyomtatás	4	0,871	nem
Postponement - M2M	4	0,660	nem
Postponement - RFID alkalmazása	4	0,574	nem

6. táblázat: A khí-négyzet próba eredményeinek összefoglalása

A válaszok alapján ugyanakkor feltáró jellegű mintázatok figyelhetők meg a digitális fejlettség és a halasztási stratégia alkalmazása között [S2]. A jelen elemzés egyes technológiák meglétét és a halasztási stratégia alkalmazását vetette össze, míg más kutatások összetett informatikai vagy ellátásilánc-képességeket és eltérő teljesítménykimeneteket vizsgáltak [P3, P46]. A mérési konstrukciók, a vállalati kör és az elemzési módszer eltérései miatt az eredmények közvetlen egyezése vagy ellentmondása nem állapítható meg pusztán a szignifikanciák összevetésével.

7.4. Összegzés és tézis

A kérdőív a Postponement, vagyis halasztási stratégia logisztikai alkalmazását vizsgálja, különös tekintettel a vizsgált vállalatok körében való elterjedtségére, céljaira, előnyeire és kihívásaira. A stratégia lényege, hogy bizonyos döntéseket - például a végső összeszerelést, csomagolást vagy szállítási irányokat - a lehető legkésőbbre halasztanak, amikor már pontosabb keresleti információk állnak rendelkezésre. Ezáltal csökkenthető a készletkockázat, növelhető a rugalmasság, és hatékonyabban lehet reagálni a változó fogyasztói igényekre. A kutatás alapján a válaszadók körülbelül egyharmada alkalmazza ezt a stratégiát, ami arra utal, hogy Magyarországon még nem számít széles körben elterjedt gyakorlatnak. Azoknál a vállalatoknál, ahol alkalmazzák, leggyakrabban a termék-végszerelés és a csomagolás területén jelenik meg.

A stratégia céljai között kiemelkedő szerepet kap a készletek csökkentése, a kereslet ingadozásainak kezelése, valamint az ügyféligények pontosabb kielégítése. Érdekesség, hogy a logisztikai költségek csökkentése nem tartozik a legfontosabb célok közé, ami arra utal, hogy a vállalatok inkább a megbízhatóságot és rugalmasságot értékelik a stratégia szempontjából. A válaszadók értékelései alapján a stratégia alkalmazása összefüggésbe hozható az Ipar 4.0 technológiák bevezetésével, azonban hatása nem minden esetben egyértelmű vagy erőteljes. A válaszok alapján a stratégia előnyei érzékelhetők, de nem teljes mértékben kihasználtak. Megállapítható, hogy a halasztási stratégia hazai alkalmazása jelenleg nem tekinthető általános gyakorlatnak a vizsgált vállalatok körében, ugyanakkor a digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák térnyerése új lehetőségeket nyit a stratégia hatékonyabb megvalósítására.

A fentiek alapján a következő tudományos tézist fogalmazom meg:

II. TÉZIS - A postponement stratégia, a digitalizáció és a logisztikai rugalmasság kapcsolata

A vizsgált vállalati mintán feltártam a postponement stratégia, a vállalati digitalizáció és a logisztikai rugalmasság közötti kapcsolatokat. Megállapítottam, hogy a stratégia megvalósítását a digitális információk rendelkezésre állása, az integrált információs rendszerek és a rugalmas logisztikai folyamatok támogatják, míg alkalmazását elsősorban erőforrás-, technológiai és szervezeti korlátok nehezítik. [S2, S3, S5]

8. A DIGITÁLIS FEJLETTSÉGI INDEX MEGALKOTÁSA

A 3. fejezet áttekintette a digitális érettség és a digitális fejlettség mérésére kidolgozott nemzetközi modelleket és indexeket. Az áttekintett mérési megközelítések elsősorban makroszintű összehasonlításra vagy általános vállalati érettségértékelésre alkalmasak, ugyanakkor korlátozott lehetőséget adnak a logisztikai rugalmassághoz és a halasztási stratégiához kapcsolódó digitális képességek értékelésére. A kutatáshoz olyan mutatóra volt szükség, amely a kérdőíves adatokból egyértelmű, reprodukálható szabályokkal számítható, és a digitális fejlettséget egyetlen, vállalatok között összehasonlítható értékben fejezi ki.

A fejezetben bemutatom a Digitális Fejlettségi Index (DFI) és az abból képzett Digitális Fejlettségi Szint (DFS) célját és fogalmi lehatárolását (8.1), számítási eljárását és az alkalmazott statisztikai eljárásokat (8.2), majd a 27 vállalat adatai alapján kapott eredményeket: a komponensek és az index eloszlását, az index belső szerkezetét, robusztusságát és érvényességét, a vállalati profilokat, valamint a DFI és a halasztási stratégia kapcsolatát (8.3). A fejezet az eredmények és a vizsgálati korlátok összegzésével, valamint a III. tézis megfogalmazásával zárul (8.4).

8.1. A DFI megalkotásának célja és indokoltsága

A digitális fejlettség mérésére használt eszközök között makroszintű mutatók és vállalati érettségi modellek különíthetők el. A makroszintű mutatók - például a DESI [P54] vagy a Network Readiness Index [P55] - országok digitális fejlettségét hasonlítják össze, így nem közvetlenül a vállalatok értékelésére készültek. A vállalati érettségi modellek közül az acatech Industrie 4.0 Maturity Index a fejlődést hat egymásra épülő szakaszban (számítógépesítés, kapcsolódás, láthatóság, átláthatóság, előrejelző képesség, alkalmazkodóképesség) és négy strukturális területen (erőforrások, információs rendszerek, szervezeti struktúra, kultúra) írja le [P1]. Az érettségi modellek többsége részletes, vállalatspecifikus értékelésre épül, és a kis- és középvállalatok sajátosságait csak korlátozottan veszi figyelembe [P20]. A vizsgált minta eltérő méretű vállalatokat foglal magában, az adatgyűjtés pedig egyetlen kérdőíves felméréssel történt, ezért olyan indexre volt szükség, amely az érettségi modellek logikáját követi, de a kérdőív tételeiből közvetlenül számítható.

A DFI megalkotásának három célja volt:

1. a vállalati digitális fejlettség számszerűsítése egységes, 0 és 10 közötti skálán, reprodukálható számítási szabályokkal,
2. a vállalatok besorolása előre rögzített határértékekkel meghatározott fejlettségi szintekbe (DFS),
3. összetett magyarázó változó kialakítása a digitális fejlettség, a logisztikai rugalmasság és a halasztási stratégia kapcsolatának vizsgálatához.

Az index fogalmi lehatárolása a harmadik célból következik. A DFI a vállalat digitális képességeit méri: a digitalizációs stratégia megvalósítási állapotát, az alapvető és az Ipar 4.0 eszközök meglétét, az informatikai rendszerek összekapcsoltságát, az adatokon alapuló láthatóságot és átláthatóságot, az előrejelző és alkalmazkodó képességet, valamint azt, hogy a válaszadó mennyire tartja fontosnak a digitális eszközöket. Logisztikai gyakorlatot - így a halasztási (postponement) stratégia alkalmazását vagy a logisztikai rugalmasság jellemzőit - az index szándékosan nem tartalmaz. Ha a postponement az index része lenne, a DFI és a halasztási stratégia közötti összefüggés részben az index szerkezetéből következne, vagyis a vizsgálat körkörössé válna. Az elemzésekben ezért a DFI magyarázó változóként, a postponement

alkalmazása pedig vizsgált kimeneti változóként szerepel, ez az elrendezés önmagában nem jelent oksági kapcsolatot.
Az index a vizsgált mintán belüli összehasonlításra készült. Mivel a minta nem reprezentatív, a DFI iparági vagy nemzetközi összehasonlításra csak további, nagyobb és megfelelően kialakított mintán végzett validálással lenne megalapozható.

8.2. DFI megalkotásának módszertana

8.2.1. Adatforrás és elemzési egység

Az index a 6. fejezetben ismertetett, 2025-ben végzett kérdőíves felmérés adataira épül. A felmérésre 27 vállalattól érkezett érvényes válasz.
Az index a kérdőív nyolc kérdésére épül: a digitalizációs stratégiára (7. kérdés), az alapvető digitális eszközök használatára és megítélt fontosságára (8-9. kérdés), az Ipar 4.0 eszközök használatára és megítélt fontosságára (10-11. kérdés), valamint a számítógépesítés és kapcsolódás, a láthatóság és átláthatóság, illetve az előrejelző képesség és alkalmazkodás tételeire (14-16. kérdés).
Az indexbe bevont 1 539 tételválaszból 4 hiányzott (0,3%). A 10. kérdés az alkalmazott eszközöket felsoroló lista, ezért a jelöletlen eszközt nem használtként kezeltem (1 eset). A 14-16. kérdés értékelő tételeinél a hiányzó választ kihagytam, és a komponenst a megválaszolt tételek átlagaként számítottam (3 eset). Az eltérő hiányadat-kezelés hatását érzékenységvizsgálattal ellenőriztem (8.3.3).

8.2.2. A komponensek és a pontozás

A DFI nyolc komponensből áll (7. táblázat). A komponensek pontszáma legfeljebb 10, de az S3 és az S5 lehetséges minimuma nem nulla, a j-edik vállalat indexértéke a komponensek súlyozott összege:

$$\mathrm{DFI}_j = \sum_{k=1}^{8} w_k \, s_{jk}, \qquad \sum_{k=1}^{8} w_k = 1, \qquad 0 \le s_{jk} \le 10 \tag{3}$$

ahol s_{jk} a j-edik vállalat k-adik komponensének pontértéke, w_k pedig az adott komponens súlya.

Jelölés	Komponens	Dimenzió	Kérdés (tételek)	Tételpontozás	Összevonás	Súly
S1	Digitalizációs stratégia	stratégiai	7. (1)	megvalósult 10, folyamatban 7, tervben 3, nincs, nem is tervezett 0	-	20%
S2	Alapvető digitális eszközök megléte	technológiai	8. (7)	használatban 10, két éven belül tervezett 3, nem használt 0	átlag	20%
S3	Az alapvető eszközök megítélt fontossága	attitűd	9. (7)	1-6 skála, átváltás: y/6 · 10	átlag	5%
S4	Ipar 4.0 eszközök megléte	technológiai	10. (12)	használatban 10, két éven belül tervezett 3, nem használt 0	átlag	20%
S5	Az Ipar 4.0 eszközök megítélt fontossága	attitűd	11. (12)	1-6 skála, átváltás: y/6 · 10	átlag	5%

Jelölés	Komponens	Dimenzió	Kérdés (tételek)	Tételpontozás	Összevonás	Súly
S6	Számítógépesítés és kapcsolódás	technológiai	14. (6)	teljes mértékben 10, részben 5, egyáltalán nem 0	súlyozott átlag, a rendszerkapcsolódás és a MES-**visszajelzés** kétszeres súlyú	10%
S7	Láthatóság és átláthatóság	adaptív	15. (6)	teljes mértékben 10, részben 5, egyáltalán nem 0	súlyozott átlag, a digitális iker kétszeres súlyú	10%
S8	Előrejelző képesség és alkalmazkodás	adaptív	16. (6)	teljes mértékben 10, részben 5, egyáltalán nem 0	átlag	10%

7. táblázat: A Digitális Fejlettségi Index komponensei, pontozása és súlya

A tételek pontozása komponenstípusonként egységes. Az eszközök használatát mérő tételeknél (S2, S4) a használatban lévő eszköz 10, a két éven belül bevezetésre tervezett 3, a nem használt 0 pontot kap, az értékelő tételeknél (S6-S8) a „teljes mértékben” válasz 10, a „részben” 5, az „egyáltalán nem” 0 pontot ér:

$$p(x) = \begin{cases} 10, & \text{használatban} \\ 3, & \text{két éven belül tervezett} \\ 0, & \text{nem használt} \end{cases} \qquad q(y) = \begin{cases} 10, & \text{teljes mértékben} \\ 5, & \text{részben} \\ 0, & \text{egyáltalán nem} \end{cases} \tag{4}$$

A tervezett eszköz 3 pontja ugyanazt a logikát követi, mint a stratégia-komponens „tervben van” kategóriája: a bevezetési szándékot az index figyelembe veszi, de lényegesen kisebb pontértékkel, mint a megvalósítást. A „részben” válasz a skála középpontjára kerül.
Az S2, S4 és S8 komponens a tételpontszámok számtani átlaga, az S6 komponensben két, az S7 komponensben egy kiemelt tétel kétszeres súlyt kap. A komponens általános alakja:

$$s_{jk} = \frac{\sum_{i \in I_{jk}} v_i \, u_{ji}}{\sum_{i \in I_{jk}} v_i} \tag{5}$$

ahol I_{jk} a j-edik vállalat k-adik komponensében megválaszolt tételek halmaza, u_{ji} a tétel (3) szerinti pontszáma, v_i pedig a tétel súlya (a kiemelt tételeknél 2, egyébként 1). Az S6 komponensben a munkafolyamatokhoz használt informatikai rendszerek egymáshoz kapcsolódása és a termelésirányítási rendszer (MES) valós idejű visszajelzése, az S7 komponensben a naprakész digitális modell („digitális iker”) megléte kiemelt tétel. A kiemelt súlyozást az indokolja, hogy az acatech-modellben a kapcsolódás szakaszát a rendszerek integrációja, a láthatóság szakaszát pedig a vállalat valós idejű digitális leképezése határozza meg [P1]. Ezek a tételek az adott fejlettségi szakaszhoz kapcsolódó képességeket jellemzik.
A két fontosság-komponens (S3, S5) az 1-6 skálán adott értékelések átlagának tízpontos skálára történő arányos átváltásával számítható:

$$s_{jk} = \frac{10}{6} \cdot \frac{1}{m_k} \sum_{i=1}^{m_k} y_{ji} \tag{6}$$

ahol m_k a tételek száma (S3: 7, S5: 12). Az alkalmazott átváltással e két komponens legkisebb lehetséges értéke 1,67, ezért a teljes DFI elméleti minimuma 0,17. Az $(y - 1)/5 \cdot 10$ alakú skálatranszformáció megszüntetné ezt az eltolódást, hatását az érzékenységvizsgálat mutatja (8.3.3).

Az S2 komponens hét eszköze: digitalizációs oktatás a vezetőség és a munkatársak számára (két tétel), felhőalapú, előfizetéses irodai szolgáltatáscsomag (pl. M365), elektronikus fizetési lehetőség, integrált vállalatirányítási rendszer, online elérhető adatbázis és papírmentes adminisztráció. Az S4 komponens tizenkét eszköze: felhőalapú rendszerek, nagy adathalmazok elemzése (Big Data analitika), mesterséges intelligencia, szimulációs technológiák, blokklánc, dolgok internete (IoT), autonóm járművek, robotok, additív gyártás (3D nyomtatás), gép-gép közötti kommunikáció (M2M), rádiófrekvenciás azonosítás (RFID) és virtuális valóság. A 7. fejezet 27. ábráján ezek közül tíz szerepel, a felhőalapú rendszerek és a virtuális valóság is része az indexnek.

8.2.3. A dimenziók és a súlyok indoklása

A nyolc komponens négy dimenzióba sorolható: a stratégiai dimenzió (S1) 20%, a technológiai dimenzió (S2, S4, S6) 50%, az adaptív dimenzió (S7, S8) 20%, az attitűd-dimenzió (S3, S5) 10% súlyú. A dimenziók az acatech-modellhez kapcsolódnak: a technológiai dimenzió az erőforrások és az információs rendszerek területét, valamint a számítógépesítés és a kapcsolódás szakaszát, az adaptív dimenzió a láthatóság, az átláthatóság, az előrejelző képesség és az alkalmazkodóképesség szakaszát, a stratégiai és az attitűddimenzió pedig a szervezeti struktúrához és a kultúrához kapcsolódik [P1].
A súlyokat elméleti megfontolások alapján, normatív módon határoztam meg:

- A technológiai dimenzióhoz rendeltem a legnagyobb súlyt, mert az acatech-modellben a magasabb szakaszok a számítógépesítésre és a kapcsolódásra épülnek, a láthatóság és az előrejelző képesség kialakításának ezek fontos feltételei.
- A stratégia 20%-os súlya azt fejezi ki, hogy a digitális átalakulás szervezeti irányítást és erőforrás-allokációt igényel [P17].
- Az adaptív dimenzió a fejlettségi modell magasabb szakaszaihoz kapcsolódó képességeket méri, két komponense azonos, 10-10%-os súlyt kapott.
- Az attitűddimenzióhoz rendeltem a legkisebb súlyt, mert a fontosság megítélése véleményt mér, amely nem azonos a megvalósítás állapotával (3.2.3. alfejezet), az értékelések ugyanakkor jelezhetik a digitalizációval kapcsolatos válaszadói nyitottságot.

A normatív súlyozás összetett mutatóknál alkalmazható megoldás, de módszertani értékválasztást jelent, ezért a súlyokat átláthatóvá kell tenni, és hatásukat érzékenységvizsgálattal kell ellenőrizni [P22]. Az érzékenységvizsgálat eredményeit a 8.3.3. alfejezet ismerteti.

8.2.4. A Digitális Fejlettségi Szint (DFS)

A DFS a DFI-ből rögzített határértékekkel képzett háromfokozatú besorolás:

$$\mathrm{DFS}_j = \begin{cases} \text{alacsony}, & 0 \le \mathrm{DFI}_j < 4 \\ \text{közepes}, & 4 \le \mathrm{DFI}_j < 7 \\ \text{magas}, & 7 \le \mathrm{DFI}_j \le 10 \end{cases} \tag{7}$$

A határértékek a skálához, nem a mintához kötöttek, így a besorolás nem függ a minta összetételétől, és más mintákon is ugyanúgy alkalmazható. A 4-es és a 7-es küszöb normatív választás, amely a stratégia-komponens 3 („tervben”) és 7 („folyamatban”) pontos horgonyértékeire támaszkodik: a 4 alatti indexérték az alacsonyabb fejlettségű válaszadói profilokat jelöli, a 4 és 7 közötti tartomány a közepes szintet jelöli, a 7 vagy afölötti érték pedig

magas digitális fejlettségi besorolást jelent. A besorolás a kerekítetlen DFI-értéken történik, a félig nyitott intervallumok miatt minden érték pontosan egy szintbe esik.

8.2.5. Statisztikai eljárások

A kis elemszámra, a komponensek eloszlására és a tételek ordinális skálájára tekintettel nemparaméteres eljárásokat alkalmaztam, kétoldali próbákkal, $\alpha = 0{,}05$ szignifikanciaszinten. Az elemzés lépései a következők voltak:

- Leíró statisztika: a komponensek és a DFI átlaga, szórása, mediánja és terjedelme, valamint a DFS szerinti megoszlás.
- Belső szerkezet: a komponensek Spearman-féle rangkorrelációja. A DFI formatív index: komponensei a fejlettség különböző összetevőit alkotják, nem egyetlen látens változó felcserélhető mérései, ezért a belső konzisztencia mutatói (például a Cronbach-alfa) önmagukban nem megfelelőek az index megbízhatóságának megítélésére [P56]. A korrelációs mátrix a különösen magas ($\rho > 0{,}8$) páronkénti együttjárások és az ellentétes irányú kapcsolatok feltárását szolgálja.
- Robusztusság: öt determinisztikus alternatíva (egyenlő súlyok, az attitűd-komponensek elhagyása, a belső kettős súlyozás elhagyása, az $(y - 1)/5 \cdot 10$ átváltás, a hiányzó adatok egységes kezelése), valamint 1 000 véletlen súlyvektor, amelyben minden súlyt az alapérték 50-150%-a közötti egyenletes eloszlásból sorsoltam, majd a súlyok összegét 1-re normáltam [P22]. Az alternatívák összehasonlításának szempontja a változatlan DFS-besorolások száma és a rangsor Spearman-korrelációja az alapindexszel.
- Érvényesség (ismert csoportok): a konstruktumérvényesség egyik vizsgálati lehetősége, hogy az index magasabb értéket mutat-e az előzetesen fejlettebbnek tekintett csoportokban. Három csoportosítást vizsgáltam: a digitalizációs stratégia stádiumát, a vállalatméretet (mikro- és kisvállalat, középvállalat, nagyvállalat, multinacionális vállalat) és a tulajdonosi hátteret (hazai, külföldi). Mivel a stratégia az index egyik komponense, ennél az összevetésnél a stratégia-komponens nélkül számított indexet használtam: $\mathrm{DFI}{-}\mathrm{S1} = (\mathrm{DFI} - 0{,}2 \cdot \mathrm{S1})/0{,}8$. A csoportokat Kruskal-Wallis-próbával (hatásnagyság: $\varepsilon^2 = H/(n - 1)$, a p-értéket 20 000 véletlen permutációval is ellenőriztem) és egzakt Mann-Whitney-próbával (hatásnagyság: rangbiszeriális r) hasonlítottam össze, a monoton kapcsolatot pedig Spearman-korrelációval értékeltem.
- Vállalati profilok: hierarchikus klaszterelemzés a nyolc standardizált komponensen, euklideszi távolsággal (7) és Ward-féle összevonással. A klaszterszámot az átlagos sziluettérték (8) [P57] és a dendrogram alapján választottam, a csoportosítás egyezését k-közép eljárással vizsgáltam (korrigált Rand-index, ARI). A klaszterezés kizárólag a digitális komponenseken alapul: a postponement-alkalmazás nem csoportosító változó, a méret és a tulajdonosi háttér kizárólag a csoportok jellemzésében szerepel.
- A DFI és a halasztási stratégia kapcsolata: a DFI eloszlásának összevetése az alkalmazók és a nem alkalmazók között (egzakt Mann-Whitney-próba), a DFS és a postponement-alkalmazás kereszttáblája (Fisher-Freeman-Halton egzakt próba, Cochran-Armitage trendpróba), valamint a klaszterek és a postponement-alkalmazás kereszttáblája. A halasztási stratégiát nem relevánsnak tartó (N/A) válaszadókat külön kategóriaként kezeltem.

A klaszterelemzés távolság- és sziluettmértéke:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{8} \left(z_{ik} - z_{jk}\right)^2}, \quad z_{ik} = \frac{s_{ik} - \bar{s}_k}{\sigma_k}, \quad \text{sil}(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i),\, b(i)\}} \tag{8}$$

ahol z_{ik} a standardizált komponensérték, a(i) az i-edik vállalat átlagos távolsága a saját klaszterének többi elemétől, b(i) pedig a legközelebbi másik klaszter elemeitől. A sziluettérték −1 és 1 közé esik, a nagyobb érték általában jobban elkülönülő klaszterbesorolást jelez.

8.3. A DFI-vel végzett vizsgálatok eredményei

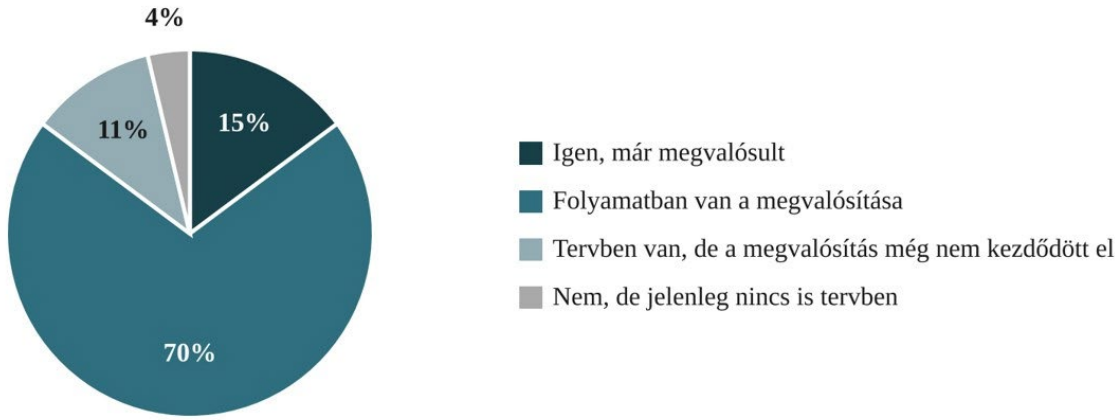
8.3.1. A komponensek leíró statisztikái

A 8. táblázat a nyolc komponens és az index leíró statisztikáit foglalja össze.

Komponens	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
S1 Digitalizációs stratégia	6,74	2,25	7,00	0,00	10,00
S2 Alapvető eszközök megléte	7,20	2,30	8,00	1,43	10,00
S3 Az alapvető eszközök fontossága	8,69	1,09	8,81	5,24	10,00
S4 Ipar 4.0 eszközök megléte	4,66	2,66	4,92	0,00	10,00
S5 Az Ipar 4.0 eszközök fontossága	7,87	1,50	8,19	4,86	10,00
S6 Számítógépesítés és kapcsolódás	6,59	2,13	6,25	1,25	10,00
S7 Láthatóság és átláthatóság	4,34	2,71	4,29	0,00	10,00
S8 Előrejelző képesség és alkalmazkodás	5,28	1,52	5,83	1,67	7,50
DFI	**6,17**	**1,77**	**6,45**	**2,01**	**9,17**

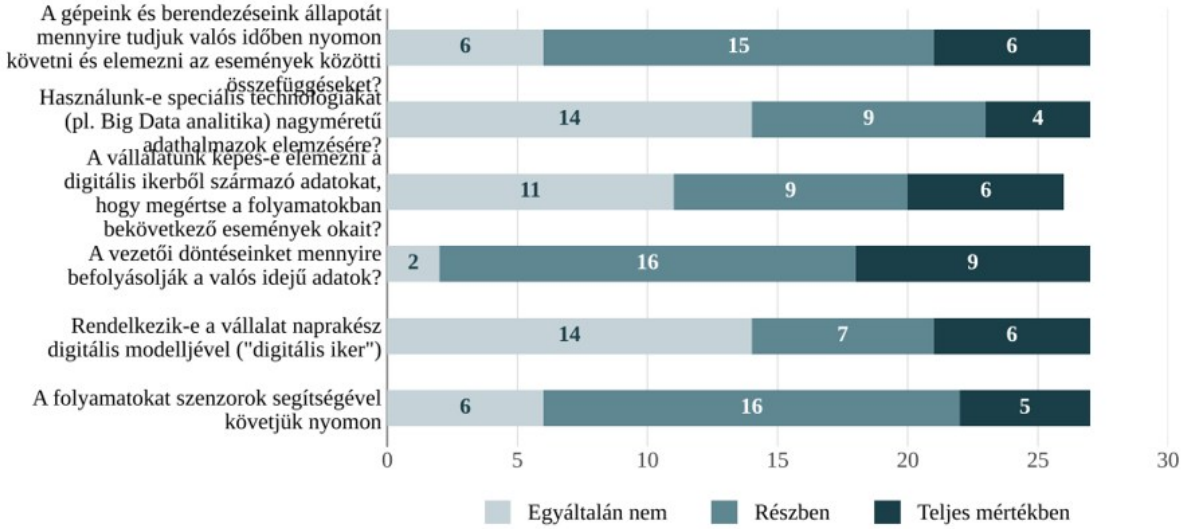
8. táblázat: A DFI-komponensek és az index leíró statisztikái (n = 27)

A stratégiai komponens (S1) eloszlását a 29. ábra mutatja. Négy válaszadó (14,8%) megvalósult, 19 (70,4%) folyamatban lévő, 3 (11,1%) tervezett digitalizációs stratégiáról számolt be, egy válaszadónál (3,7%) pedig nincs stratégia, és nem is terveznek ilyet. A válaszok túlnyomó többsége megvalósult, folyamatban lévő vagy tervezett stratégiát jelez, a vállalatok a megvalósítás stádiumában különböznek.



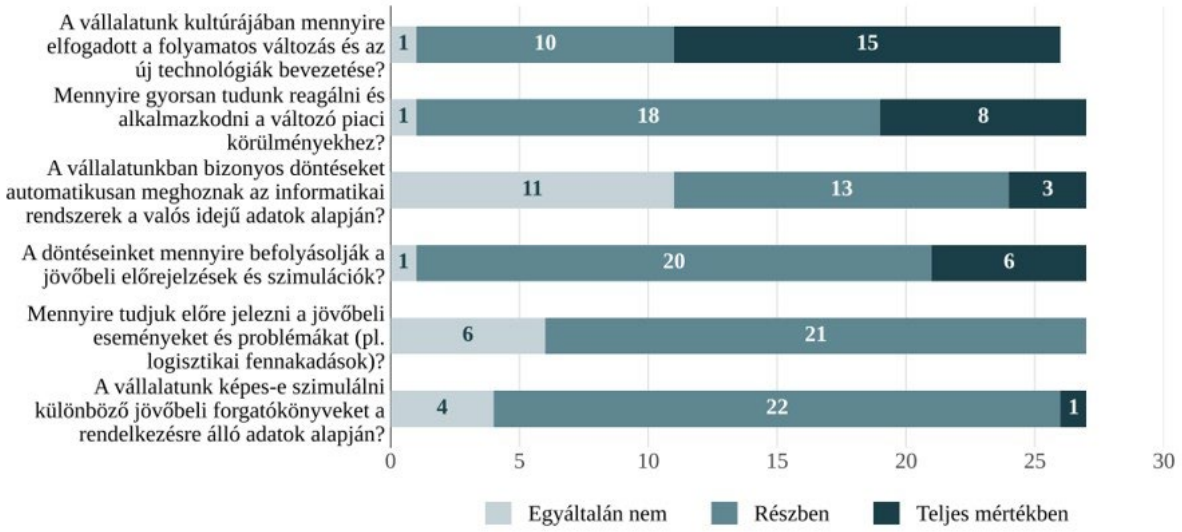
29. ábra: A digitalizációs stratégia megléte a kérdőíves kutatásban részt vevő vállalatoknál

A technológiai dimenzión belül az alapvető eszközök pontszáma (S2: 7,20) lényegesen magasabb az Ipar 4.0 eszközökénél (S4: 4,66). Az alapvető eszközök közül a felhőalapú irodai szolgáltatáscsomag (24 válaszadó), az integrált vállalatirányítási rendszer (22) és az online adatbázis (20) a leggyakoribb, a legkevésbé elterjedt az elektronikus fizetési lehetőség (14 válaszadó használja, 13 nem). Az Ipar 4.0 eszközök közül a felhőalapú rendszereket (24), a robotokat (16), a mesterséges intelligenciát és az RFID-t (14-14) alkalmazzák a legtöbben, a blokkláncot (1), a virtuális valóságot (5) és a dolgok internetét (8) a legkevesebben. A számítógépesítés és kapcsolódás komponense (S6: 6,59) közepes szintet mutat: a rendszerek egymáshoz kapcsolódását egyetlen válaszadó sem ítélte teljesen hiányzónak (13 részben, 14 teljes mértékben jellemzőnek tartja), a minőségellenőrzés teljes automatizáltságáról viszont csak két válaszadó számolt be.
Az adaptív dimenzió átlaga a legalacsonyabb. A láthatóság és átláthatóság komponensének (S7: 4,34) a legalacsonyabb az átlaga (30. ábra): 25 válaszadó szerint a valós idejű adatok legalább részben befolyásolják a vezetői döntéseket, naprakész digitális modellel („digitális iker”) azonban 14 válaszadó egyáltalán nem rendelkezik, és ugyanennyien nem használnak nagy adathalmazok elemzésére szolgáló technológiát.



30. ábra: A láthatóság és átláthatóság tételeinek értékelése (15. kérdés, a digitális ikerből származó adatok elemzésére vonatkozó tételnél n = 26, a többinél n = 27)

Az előrejelző képesség és alkalmazkodás komponensében (S8: 5,28) a „részben” válasz dominál (a 161 tételválasz 64,6%-a, 30. ábra). A vállalati kultúrában a változás és az új technológiák elfogadottsága kapta a legtöbb „teljes mértékben” választ (15 válaszadónál teljes mértékben jellemző), a jövőbeli események és problémák előrejelzését viszont egyetlen válaszadó sem ítélte teljes mértékben megoldottnak, és 11 válaszadónál egyáltalán nincsenek az informatikai rendszer által automatikusan hozott döntések. A válaszok alapján a változásra való nyitottság kedvezőbb megítélést kapott, mint az előrejelző és az automatizált döntési képességek kiépítettsége.
Az attitűd-komponensek átlaga magas, szórásuk kicsi (S3: 8,69; S5: 7,87): a válaszadók a digitális eszközöket a használatuk mértékéhez képest is fontosnak ítélik. Az Ipar 4.0 eszközök megítélt fontossága (7,87) és tényleges elterjedtsége (4,66) közötti különbség a megítélés és a megvalósítás közötti rést jelzi, ami összhangban áll az attitűddimenzió alacsonyabb súlyozásának módszertani indoklásával.



31. ábra: Az előrejelző képesség és az alkalmazkodás tételeinek értékelése (16. kérdés, a vállalati kultúrára vonatkozó tételnél n = 26, a többinél n = 27)

8.3.2. A DFI eloszlása és a Digitális Fejlettségi Szintek

A DFI átlaga 6,17 (szórás: 1,77), mediánja 6,45, terjedelme 2,01-9,17. Az eloszlásban az alacsonyabb értékek felé húzódó rész figyelhető meg: a vállalatok kétharmada (18) 5 és 8 közé esik, és néhány alacsony érték csökkenti az átlagot. A rögzített határértékek alapján 4 válasz (14,8%) alacsony, 16 (59,3%) közepes, 7 (25,9%) magas fejlettségi szintű (9. táblázat).

Fejlettségi szint	DFI-tartomány	n	Arány	DFI-átlag	Legkisebb-legnagyobb DFI
Alacsony	[0; 4)	4	14,8%	2,90	2,010-3,988
Közepes	[4; 7)	16	59,3%	6,11	4,807-6,998
Magas	[7; 10]	7	25,9%	8,17	7,383-9,174
Összesen	**[0; 10]**	**27**	**100,0%**	**6,17**	**2,010-9,174**

9. táblázat: A válaszok megoszlása Digitális Fejlettségi Szint szerint

Két vállalat indexértéke a határérték közvetlen közelébe esik (3,988 és 6,998), besorolásuk érzékeny a súlyok módosítására, mert már kisebb változtatás esetén is másik kategóriába kerülhetnek (8.3.3).

8.3.3. Az index belső szerkezete és robusztussága

A komponensek rangkorrelációit a 10. táblázat mutatja. A hat fejlettségi komponens (S1, S2, S4, S6, S7, S8) között minden korreláció pozitív (ρ = 0,35-0,74), ami összhangban áll azzal, hogy a digitális fejlettség egymáshoz kapcsolódó összetevőit jellemzik. Egyik korreláció sem haladja meg a 0,8-at, ez nem utal kiugróan magas páronkénti átfedésre, de önmagában nem zárja ki a tartalmi redundanciát. A legerősebb kapcsolat az Ipar 4.0 eszközök és a számítógépesítés-kapcsolódás (ρ = 0,74), illetve az Ipar 4.0 eszközök és a láthatóság-átláthatóság (ρ = 0,70) között áll fenn, ami megfelel az acatech-modell szakaszlogikájának: a fejlett eszközök az integrált rendszerekkel és az adatokon alapuló láthatósággal együtt jelennek meg. Az Ipar 4.0 eszközök megítélt fontossága (S5) gyakorlatilag független a stratégiától (ρ = −0,03) és az alapvető eszközök meglététől (ρ = 0,07), ami az attitűd és a tényleges megvalósítás részleges elkülönülésére utal.

Komponens	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S1 Stratégia	1							
S2 Alapvető eszközök	0,55	1						
S3 Alapvető eszk. fontossága	0,21	0,56	1					
S4 Ipar 4.0 eszközök	0,52	0,60	0,41	1				
S5 Ipar 4.0 eszk. fontossága	−0,03	0,07	0,40	0,34	1			
S6 Számítógépesítés, kapcsolódás	0,57	0,55	0,33	0,74	0,15	1		
S7 Láthatóság, átláthatóság	0,64	0,43	0,47	0,70	0,30	0,63	1	
S8 Előrejelzés, alkalmazkodás	0,47	0,41	0,40	0,35	0,17	0,43	0,58	1

10. táblázat: A DFI-komponensek Spearman-féle rangkorrelációs mátrixa (n = 27)

A súlyozás hatását a 11. táblázat foglalja össze. A determinisztikus változatokban a rangsor gyakorlatilag változatlan ($\rho \geq 0{,}989$), és közülük csak az egyenlő súlyozás módosítja a besorolást: négy vállalat kerül eggyel magasabb szintre, mivel az egyenlő súlyozás a magas pontszámú attitűd-komponensek relatív súlyát növeli. A belső kettős súlyozás, a fontosság-skála átváltása és a hiányzó adatok kezelése egyetlen besorolást sem változtat meg. Az 1 000 véletlen súlyvektor mellett a besorolások átlagosan 95,1%-a változatlan, a rangsor korrelációja az alapindexszel legalább 0,966. Az átsorolások elsősorban a határértékek közelében fordulnak elő: a 6,998 és a 3,988 indexértékű vállalat a futások mintegy felében (50,1, illetve 48,0%-ában), a 6,69 és a 6,89 értékű válasz 16,6, illetve 11,2%-ában vált szintet, a többi válasz legfeljebb 3,6%-ában.

Vált.	Leírás	DFS-megoszlás (alacsony / közepes / magas)	Változatlan besorolás	Spearman ρ az alapindexszel	Legnagyobb DFI-eltérés
Alap	súlyok: 20/20/5/20/5/10/10/10%	4 / 16 / 7	-	-	-
A	egyenlő súlyok (8 × 12,5%)	2 / 16 / 9	23/27	0,989	1,39
B	az attitűd-komponensek (S3, S5) nélkül	4 / 16 / 7	27/27	0,998	0,72
C	belső kettős súlyozás nélkül (S6, S7)	4 / 16 / 7	27/27	0,998	0,10
D	fontosság-átváltás: (y − 1)/5 · 10	4 / 16 / 7	27/27	0,998	0,09
E	10. kérdés: a hiányzó tétel kihagyása	4 / 16 / 7	27/27	1,000	0,14
F	1 000 véletlen súlyvektor (az alapsúlyok 50-150%-a)	3-5 / 11-17 / 5-13	átlag 95,1% (min. 74,1%)	medián 0,995 (min. 0,966)	-

11. táblázat: Az érzékenységvizsgálat eredményei

8.3.4. Az index érvényessége

Az ismert csoportok szerinti első ellenőrzés a digitalizációs stratégia megvalósítási stádiumára épült. A stratégia-komponens nélkül számított index (DFI-S1) a megvalósult stratégiájú vállalatoknál a legmagasabb (átlag: 7,50; n = 4), a folyamatban lévő stratégiájúaknál közepes (6,34; n = 19), és azoknál a legalacsonyabb, amelyeknél a megvalósítás még nem kezdődött el

(3,07; n = 4, a „tervben” és a „nincs is tervben” kategória összevonva). A különbség szignifikáns és nagy hatású (Kruskal-Wallis H = 11,59; p = 0,003; permutációs p < 0,001; ε^2 = 0,45), a kapcsolat monoton (ρ = 0,64; p < 0,001). Mivel a stratégiai komponens nem része az összehasonlított indexnek, az eredmény a stratégiai komponens nélkül képzett index és a stratégiai stádium együttjárását jelzi: ahol a stratégia előrehaladottabb, ott a technológiai, az adaptív és az attitűd-komponensek is magasabbak. Az együttjárás becslését ugyanakkor az is befolyásolhatja, hogy minden adatot ugyanaz a válaszadó szolgáltatta (közös módszerből eredő torzítás).

A vállalatméret és a tulajdonosi háttér szerinti összehasonlítást a 12. táblázat foglalja össze. A DFI-átlag a mikro- és kisvállalatok csoportjában a legalacsonyabb (átlag: 4,12), a multinacionális vállalatoknál a legmagasabb (7,44), a különbség szignifikáns és nagy hatású (H = 12,72, p = 0,005, permutációs p = 0,001, ε^2 = 0,49), és a méret, valamint a DFI között erős monoton kapcsolat áll fenn (ρ = 0,68, p < 0,001). A közép- és a nagyvállalatok átlaga közel azonos (5,88 és 5,78), az eltérés leginkább a legkisebb és a multinacionális vállalatok között látható. A külföldi tulajdonú vállalatok DFI-je (6,89) szignifikánsan magasabb a hazai tulajdonúakénál (5,10, egzakt Mann-Whitney U = 31, p = 0,009, r = 0,61). Az eredmény összhangban van azzal a megállapítással, hogy a multinacionális vállalatok és a kis- és középvállalatok eltérő feltételekkel vezetik be az Ipar 4.0 megoldásait [P37]. A méret és a tulajdonosi háttér önálló összefüggése ebben a mintában nem különíthető el: mind a 11 multinacionális vállalat külföldi, mind a 3 mikrovállalat hazai tulajdonú.

Csoport	n	Átlag	Medián	Legkisebb-legnagyobb	Próba
Vállalatméret (DFI)					
Mikro- és kisvállalat	5	4,12	3,99	2,010-6,011	H = 12,72, p = 0,005
Középvállalat	5	5,88	5,58	4,807-6,998	ε^2 = 0,49
Nagyvállalat	6	5,78	6,24	2,766-7,668	ρ = 0,68, p < 0,001
Multinacionális vállalat	11	7,44	7,38	6,010-9,174	
Tulajdonosi háttér (DFI)					
Hazai	10	5,10	5,35	2,010-7,668	U = 31, p = 0,009
Külföldi	16	6,89	6,78	2,766-9,174	r = 0,61
Vegyes	1	5,35	-	-	nem tesztelt
Stratégiai stádium (DFI$_{-S1}$)					
Megvalósult	4	7,50	7,58	5,858-8,967	H = 11,59, p = 0,003
Folyamatban	19	6,34	6,31	4,258-9,029	ε^2 = 0,45
Tervben vagy nincs	4	3,07	3,14	1,762-4,235	ρ = 0,64, p < 0,001

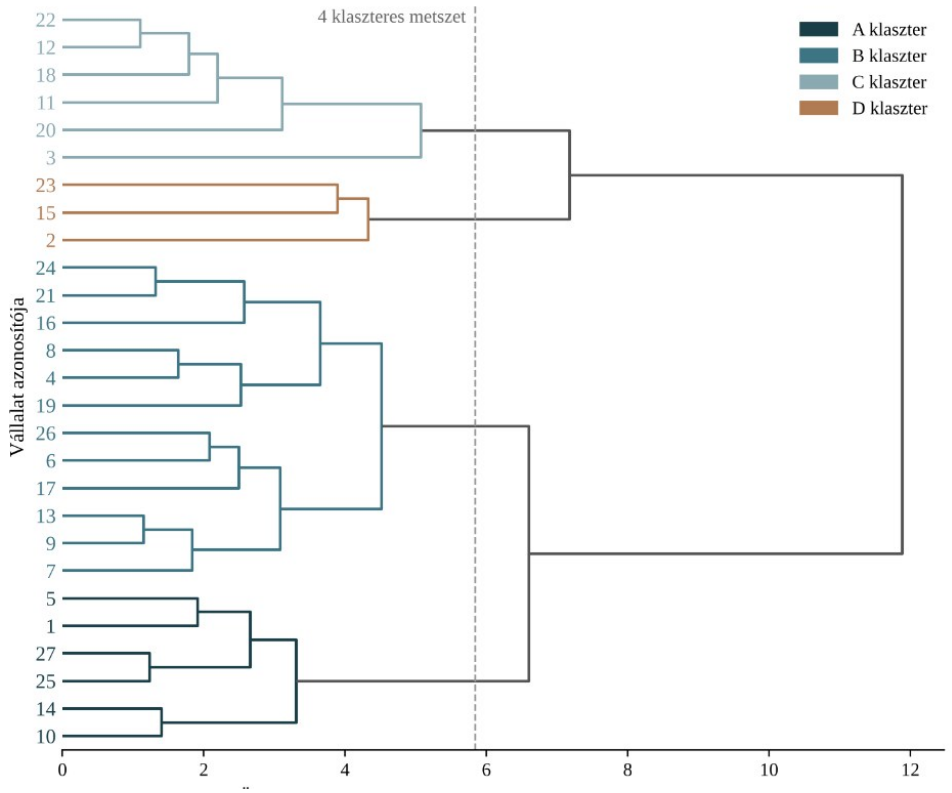
12. táblázat: A DFI a vállalatméret, a tulajdonosi háttér és a stratégiai stádium szerint

A tulajdon szerinti különbség nem minden komponensre terjed ki. A külföldi tulajdonú vállalatok az Ipar 4.0 eszközök (S4: 6,12; illetve 2,47; p < 0,001), a számítógépesítés és kapcsolódás (S6: 7,37, illetve 5,12, p = 0,007) és a láthatóság-átláthatóság (S7: 5,27; illetve 2,86; p = 0,032) komponensében érnek el magasabb értéket, az első kettő a többszörös összehasonlításra vonatkozó Holm-korrekció után is szignifikáns. A stratégia (S1: 6,94, illetve 6,40; p = 0,56), az alapvető eszközök (S2: 7,90, illetve 6,37; p = 0,13) és az előrejelző-

alkalmazkodó képesség (S8: 5,57, illetve 4,77; p = 0,27) tekintetében nem mutatható ki szignifikáns különbség, a gyors piaci reagálásra vonatkozó tételben pedig a hazai válaszadók átlaga valamivel magasabb (6,50, illetve 6,25). A vizsgált mintában a külföldi tulajdonú vállalatokhoz magasabb fejlett eszköz- és rendszerintegrációs pontszámok társultak, az előrejelző-alkalmazkodó képességben viszont nem volt kimutatható szignifikáns eltérés.
A stratégia megvalósítási stádiumának megoszlása a vállalatméret és a tulajdonosi háttér szerint is különbözik. A multinacionális vállalatok mindegyike (11/11) megvalósult vagy folyamatban lévő stratégiáról számolt be, ez az arány a középvállalatoknál 5/5, a nagyvállalatoknál 5/6, a kisvállalatoknál 1/2, a mikrovállalatoknál 1/3 (a másik két mikrovállalat a tervezésnél tart). A külföldi tulajdonú vállalatok 15/16-a, a hazai tulajdonúak 7/10-e rendelkezik megvalósult vagy folyamatban lévő stratégiával, a további három hazai válaszadó a „tervben van” választ adta, így valamennyi hazai tulajdonú vállalatra vonatkozó válasz legalább tervezett stratégiát jelöl meg. Az egyetlen, stratégiát nem is tervező válaszadó külföldi tulajdonú nagyvállalat.

8.3.5. Vállalati profilok

A klaszterelemzés szerint a vállalatok nem alkotnak élesen elkülönülő csoportokat: az átlagos sziluettérték két klaszter esetén a legnagyobb (0,29), három klaszternél 0,23, négynél 0,18, öt és hat klaszternél 0,17. A viszonylag alacsony sziluettértékek alapján a klaszterek célszerűen leíró tipológiaként, nem pedig egyértelműen elkülönülő természetes csoportokként értelmezhetők. A két fő ág (18 és 9 vállalat) a k-közép eljárás eredményével is nagymértékben egyezik (ARI = 0,85), és mindkét ág további két, szakmailag értelmezhető alcsoportra osztható (32. ábra), a négy klaszteres megoldás és a k-közép eljárás egyezése is jó (ARI = 0,76). A profilokat ezért a négy klaszteres megoldással írom le (13. táblázat).



32. ábra: A vállalatok hierarchikus klaszterelemzésének dendrogramja (Ward-eljárás, nyolc standardizált DFI-komponens)

Jellemző	A	B	C	D
Megnevezés	**Digitálisan integrált**	**Megvalósítás alatt, erős alapokkal**	**Alapszintű digitalizáció**	**Kezdeti szakasz**
Vállalatok száma	6	12	6	3
DFI	8,17	6,56	5,21	2,54
S1 Stratégia	8,00	7,50	6,33	2,00
S2 Alapvető eszközök	8,48	8,06	6,71	2,19
S3 Alapvető eszközök fontossága	9,17	9,07	7,98	7,62
S4 Ipar 4.0 eszközök	8,18	4,62	3,19	0,72
S5 Ipar 4.0 eszközök fontossága	8,56	8,32	6,04	8,33
S6 Számítógépesítés és kapcsolódás	9,14	6,41	5,94	3,54
S7 Láthatóság és átláthatóság	7,98	4,52	2,26	0,48
S8 Előrejelzés és alkalmazkodás	6,39	5,57	4,44	3,61
Átlagos sziluettérték	0,30	0,13	0,17	0,11
Méret: multinacionális / nagy / közép / mikro-kis	6 / 0 / 0 / 0	4 / 4 / 3 / 1	1 / 1 / 2 / 2	0 / 1 / 0 / 2
Tulajdon: külföldi / hazai / vegyes	6 / 0 / 0	8 / 4 / 0	1 / 4 / 1	1 / 2 / 0
DFS: alacsony / közepes / magas	0 / 1 / 5	0 / 10 / 2	1 / 5 / 0	3 / 0 / 0

13. táblázat: A négy vállalati profil jellemzői (klaszterátlagok)

Az átlagos láncolás (average linkage) ugyanezen az adaton egy nagy és néhány kis csoportot eredményezett (két klaszternél 24 és 3 vállalat, ennél több klaszternél egyelemű csoportokat), ezért a profilalkotáshoz a csoporton belüli szórást minimalizáló Ward-eljárást választottam.

- A - Digitálisan integrált (n = 6): a legmagasabb DFI (8,17), az Ipar 4.0 eszközök (8,18), a számítógépesítés-kapcsolódás (9,14) és a láthatóság-átláthatóság (7,98) pontszáma a vizsgált profilok között a legmagasabb. Mind a hat vállalat multinacionális, külföldi tulajdonú, közülük öt magas szintű.
- B - Megvalósítás alatt, erős alapokkal (n = 12): a stratégia (7,50) és az alapvető eszközök (8,06) szintje megközelíti az A profilét, az Ipar 4.0 eszközök (4,62) és a láthatóság-átláthatóság (4,52) azonban jóval alacsonyabb. Különböző méretű vállalatok (4 multinacionális, 4 nagy-, 3 közép-, 1 kisvállalat) alkotják, többségük közepes szintű.
- C - Alapszintű digitalizáció (n = 6): közepes pontszámú alapvető eszközellátottság (6,71) mellett alacsony Ipar 4.0 eszközszint (3,19) és láthatóság-átláthatóság (2,26) jellemzi, ebben a profilban a legalacsonyabb az Ipar 4.0 eszközök megítélt fontossága (6,04). Négy vállalat hazai tulajdonú.
- D - Kezdeti szakasz (n = 3): a stratégia (2,00), az alapvető eszközök (2,19) és az Ipar 4.0 eszközök (0,72) szintje is nagyon alacsony, az Ipar 4.0 eszközök megítélt fontossága (8,33) ugyanakkor közel áll az A és a B profil értékéhez. Mindhárom vállalat alacsony szintű.

A profilok eltérő digitális fejlettségi állapotokat mutatnak, a keresztmetszeti adatok önmagukban nem igazolnak egymásra épülő fejlődési útvonalat. A B és az A profil közötti különbség nem a stratégiában vagy az alapvető eszközökben, hanem az Ipar 4.0 eszközökben, a rendszerintegrációban és a láthatóságban jelentkezik, ami az acatech-modell kapcsolódási és láthatósági szakaszával értelmezhető [P1]. A megítélt fontosság nem követi a megvalósítás

szintjét: a legkevésbé fejlett D profil az A és B profilhoz hasonlóan fontosnak értékeli a fejlett eszközöket, a C profil viszont a legkevésbé. Az alacsonyabb technológiai fejlettség ezért nem minden esetben jár alacsonyabb megítélt fontossággal, ez a 8.3.1. alfejezetben kimutatott, a megítélés és a megvalósítás közötti rés vállalati szintű megfelelője.

8.3.6. A DFI és a halasztási stratégia kapcsolata

A 7. fejezet a halasztási stratégia alkalmazását két digitális jellemzővel vetette össze: a digitalizációs stratégia stádiumával (28. ábra) és az Ipar 4.0 eszközök meglétével, utóbbi esetben 5%-os szignifikanciaszinten nem mutatott ki szignifikáns összefüggést. Mindkét jellemző a DFI komponense (S1 és S4, együttesen 40%-os súllyal), ezért a 7. fejezet eredményei és az alábbi elemzés nem független bizonyítékok. A DFI-alapú vizsgálat azt mutatja meg, hogy a több összetevőből számított digitális fejlettség együtt jár-e a halasztási stratégia alkalmazásával.

A 20. ábra szerint a válaszadók 33%-a alkalmazza a halasztási stratégiát, 41%-a nem alkalmazza, 26%-a számára pedig nem releváns. Az alkalmazók DFI-mediánja 6,69 (átlag: 6,86), a nem alkalmazóké 6,21 (átlag: 5,94). A különbség az alkalmazók javára mutat, de kicsi és nem szignifikáns (egzakt Mann-Whitney $U = 62$; $p = 0,37$; $r = 0,25$). A halasztási stratégiát nem relevánsnak tartók DFI-mediánja 6,68 (átlag: 5,66), a három csoport között sincs szignifikáns különbség (Kruskal-Wallis $H = 1,43$; $p = 0,49$).

A DFS és a postponement-alkalmazás kereszttábláját a 14. táblázat mutatja. Az alkalmazók aránya az alkalmazók és a nem alkalmazók körében a fejlettségi szinttel monoton nő: alacsony szinten 0% (0/2), közepes szinten 38,5% (5/13), magas szinten 80,0% (4/5). A trend iránya egyértelmű, 0,05-os szinten azonban nem szignifikáns (egzakt Cochran-Armitage trendpróba: $p = 0,056$; Fisher-Freeman-Halton-próba: $p = 0,12$). A profilok között nincs érdemi eltérés (13. táblázat utolsó sora, Fisher-Freeman-Halton-próba: $p = 1,00$). Komponensszinten egyedül az Ipar 4.0 eszközök megítélt fontossága magasabb az alkalmazóknál (8,35, illetve 7,17; $p = 0,048$), ez a különbség azonban a nyolc összehasonlításra vonatkozó Holm-korrekció után nem szignifikáns.

Fejlettségi szint	Alkalmazza	Nem alkalmazza	Nem releváns (N/A)	Összesen	Alkalmazók aránya (igen / igen + nem)
Alacsony	0	2	2	4	0,0%
Közepes	5	8	3	16	38,5%
Magas	4	1	2	7	80,0%
Összesen	**9**	**11**	**7**	**27**	**45,0%**

14. táblázat: A Digitális Fejlettségi Szint és a halasztási stratégia alkalmazásának kereszttáblája (n = 27)

A kis csoportméretek miatt az elemzés csak nagy hatást képes szignifikánsként kimutatni, ezért az eredmények értelmezésénél a p-érték mellett a hatás nagyságát és irányát is figyelembe veszem. Az eredmények együttesen pozitív irányú, de gyenge és statisztikailag nem igazolt kapcsolatra utalnak: a magasabb fejlettségi szinten nagyobb a halasztási stratégiát alkalmazók aránya, a DFI-ben mért különbség azonban kicsi, és a vizsgált mintában a véletlen ingadozás nem zárható ki. Ez összhangban van a 7. fejezet eredményével, amely az Ipar 4.0 eszközök megléte és a postponement-alkalmazás között sem talált szignifikáns összefüggést. A digitális

fejlettség a mintában tehát nem bizonyult a halasztási stratégia alkalmazásának erős magyarázó tényezőjének, a megfigyelt tendencia igazolásához nagyobb mintára van szükség.

8.3.7. A digitális fejlettség és a logisztikai rugalmasság kapcsolata

Az előző alfejezet a digitális fejlettség és a halasztási stratégia alkalmazása közötti kapcsolatot vizsgálta. Ehhez kapcsolódva azt elemzem, hogy a magasabb DFI-érték kedvezőbb logisztikai rugalmassági önértékeléssel jár-e együtt. A vizsgálat a 6. fejezetben bemutatott rugalmassági jellemzőket a 8.2. alfejezetben meghatározott digitális fejlettséggel veti össze.

Az elemzéshez a kérdőív 17. kérdésének általános logisztikai rugalmasságra vonatkozó értékelését, valamint a volumen-, a mix-, a szállítási, az időbeli és az útvonalrugalmasság öt külön tételét használtam. A válaszadók valamennyi jellemzőt 1–6 skálán értékelték, ahol a magasabb érték kedvezőbbnek ítélt képességet jelentett. Az időbeli és az útvonalrugalmasság eredményeit a 6.3. alfejezetben ismertetett kérdőíves meghatározás szerint értelmezem. A 17. kérdés keresleti bizonytalanságot mérő két további tétele külön környezeti jellemző, ezért ezeket nem vontam össze a rugalmassági értékelésekkel. A 23. kérdés szöveges válaszai a rugalmasság gyakorlati jelentőségének kvalitatív értelmezését egészítik ki a 6. fejezetben.

Az ordinális válaszokra és a kis elemszámra tekintettel Spearman-féle rangkorrelációt számítottam. A kétoldali p-értékeket 199 999 véletlen párosítási permutációval becsültem, az azonos értékekhez átlagrangot rendeltem. A hat összehasonlítás p-értékeit együttesen Holm-eljárással korrigáltam, $\alpha = 0{,}05$ szignifikanciaszint mellett. A korrelációk 95%-os konfidenciaintervallumát az összetartozó válaszadatpárok együttes újramintázásával, 20 000 ismétléses, torzításkorrigált és gyorsított (BCa) bootstrap-eljárással becsültem. Az eredményeket a 15. táblázat foglalja össze.

Rugalmassági értékelés	ρ	95%-os intervallum	Permutációs p	Korrigált p (Holm)
Általános logisztikai rugalmasság	0,420	[-0,061; 0,691]	0,031	0,123
Volumenrugalmasság	0,519	[0,047; 0,776]	0,006	0,037
Mixrugalmasság	0,362	[-0,096; 0,702]	0,064	0,191
Szállítási rugalmasság	0,441	[0,019; 0,718]	0,022	0,111
Időbeli rugalmasság	0,363	[-0,109; 0,683]	0,064	0,191
Útvonalrugalmasság	0,260	[-0,161; 0,593]	0,187	0,191

15. táblázat: A DFI és az önértékelt logisztikai rugalmasság kapcsolatának eredményei (n = 27). Forrás: saját számítás a kérdőíves adatfelvétel alapján

A legnagyobb korreláció a DFI és a volumenrugalmasság között figyelhető meg ($\rho = 0{,}519$; $p = 0{,}006$). A kapcsolat a hat összehasonlításra alkalmazott Holm-korrekció után is szignifikáns marad (korrigált $p = 0{,}037$). A vizsgált válaszok között tehát a magasabb digitális fejlettséghez a keresleti volumen jelentős növekedéséhez vagy csökkenéséhez való gyors és költséghatékony alkalmazkodás kedvezőbb önértékelése társult. A 95%-os konfidenciaintervallum ugyanakkor széles [0,047; 0,776], így a kapcsolat erőssége csak jelentős bizonytalansággal becsülhető.

Az általános logisztikai rugalmasság és a szállítási rugalmasság esetében is pozitív korreláció figyelhető meg ($\rho = 0{,}420$, illetve 0,441). A korrigálatlan p-értékek 0,05 alattiak, a többszörös

összehasonlításra végzett korrekció után azonban e két eredmény nem szignifikáns. A mix-, az időbeli és az útvonalrugalmasság korrelációi szintén pozitívak, de egyik esetben sem mutatható ki szignifikáns összefüggés. Ezeket az eredményeket ezért pozitív irányú, de bizonytalan együttjárásként értelmezem, a nem szignifikáns eredményekből a kapcsolat hiánya nem állapítható meg.

A kapcsolat értékelésénél figyelembe kell venni a mérőtételek tartalmát is. A DFI S8 komponense az előrejelző képességet és az alkalmazkodást jellemzi, és egyik tétele közvetlenül a változó piaci körülményekhez való gyors alkalmazkodásra kérdez rá. Ez tartalmilag közel áll a rugalmassági önértékelésekhez. A lehetséges tartalmi átfedés hatását ezért az S8 komponens nélküli indexszel is megvizsgáltam. Az S8 eredeti 10%-os súlyát elhagyva, a fennmaradó súlyokat egységnyi összegre normálva a módosított index:

$$DFI_{-S8,j} = \frac{DFI_j - 0{,}10 \cdot S8_j}{0{,}90} \tag{9}$$

ahol az $S8_j$ a j-edik válasz előrejelző képesség és alkalmazkodás komponensének pontszáma. Az indexváltozatot kizárólag érzékenységvizsgálatra használtam, a 8.2. alfejezetben meghatározott DFI változatlan maradt. A hat kapcsolatot azonos eljárással újraszámítottam, és az érzékenységvizsgálat hat p-értékére külön Holm-korrekciót alkalmaztam.

Az S8 nélküli index és a volumenrugalmasság korrelációja $\rho = 0{,}533$; a permutációs p-érték 0,005, a korrigált p-érték 0,029. A 95%-os konfidenciaintervallum [0,082; 0,781]. A többi rugalmassági értékelés a korrekció után ebben az indexváltozatban sem mutat szignifikáns kapcsolatot. A volumenrugalmassággal megfigyelt pozitív együttjárás tehát az S8 komponens elhagyása mellett is fennmarad. Az egyes válaszok befolyását külön is ellenőriztem: a válaszokat egyenként elhagyva az eredeti DFI és a volumenrugalmasság korrelációja 0,465 és 0,660 között változott, vagyis a kapcsolat pozitív iránya valamennyi esetben megmaradt.

A digitális fejlettséget és a rugalmasságot ugyanaz a válaszadó értékelte, így az együttjárásban a válaszadói megítélés közös sajátosságai is szerepet játszhatnak. A páronkénti korrelációk a vállalatméret, a tulajdonosi háttér és az erőforrásellátottság lehetséges hatását sem választják el a digitális fejlettségétől. Az S8 nélküli ellenőrzés a tartalmi átfedés egy részét kezeli, a keresztmetszeti adatfelvétel és az önértékelés korlátait azonban nem szünteti meg. A vizsgálat így együttjárást jelez, oksági kapcsolatot vagy a digitalizáció hatására bekövetkező rugalmasságnövekedést nem igazol.

A 27 válaszon végzett elemzés pozitív, a többszörös összehasonlításra alkalmazott korrekció után is szignifikáns együttjárást jelzett a digitális fejlettség és az önértékelt volumenrugalmasság között. Ez kiegészíti a 8.3.6. alfejezet eredményét: a halasztási stratégia alkalmazása egy konkrét működési gyakorlat jelenlétét, a rugalmassági értékelések pedig a vállalat megítélt alkalmazkodóképességét jellemzik. A kapcsolat pozitív iránya az S8 nélküli indexváltozat mellett is fennmarad, a többi dimenzióra vonatkozó következtetések megerősítéséhez pedig további adatok szükségesek.

8.4. Összegzés és tézis

A fejezetben kidolgoztam a Digitális Fejlettségi Indexet, amely nyolc komponens alapján, négy dimenzióba rendezett pontozási és súlyozási szabályokkal jellemzi a vállalatok digitális fejlettségét, és amelyből rögzített határértékekkel háromfokozatú Digitális Fejlettségi Szint képezhető. Az index a kérdőív adataiból reprodukálható módon számítható, és a logisztikai gyakorlatok közvetlen mérőtételeit szándékosan nem tartalmazza, így a halasztási stratégia és

a logisztikai rugalmasság magyarázó változójaként alkalmazható. A vizsgálatok fő eredményei a következők:

- A 27 vállalat átlagos DFI-értéke 6,17; 4 vállalat alacsony, 16 közepes, 7 magas fejlettségi szintű. Az alapvető digitális eszközök pontszáma magasabb a fejlettebb Ipar 4.0 eszközökénél, az adaptív dimenzióban különösen a láthatóság és az átláthatóság mutat alacsony értéket.
- A vállalatok DFI szerinti rangsora az alkalmazott súlyváltozatok mellett stabil (a determinisztikus változatokban $\rho \geq 0{,}989$, 1 000 véletlen súlyvektor mellett $\rho \geq 0{,}966$), a szintbesorolás érzékenysége főként a határértékek közelében jelentkezik.
- Az index a vizsgált mintában eltérő értékeket mutat a digitalizációs stratégia stádiuma, a vállalatméret és a tulajdonosi háttér szerint képzett csoportokban. A külföldi tulajdonú vállalatok magasabb pontszáma a fejlett eszközökben és a rendszerintegrációban jelentkezik, az előrejelző és alkalmazkodó képességben nem.
- A vállalatok négy, eltérő fejlettségi jellemzőkkel leírható profilba sorolhatók, a fejlettebb profilokat az Ipar 4.0 eszközök, a rendszerintegráció és a láthatóság magasabb pontszámai jellemzik. A megítélt fontosság nem követi a megvalósítás szintjét.
- A DFI és a halasztási stratégia alkalmazása között pozitív irányú, de statisztikailag nem szignifikáns kapcsolat figyelhető meg: az alkalmazók aránya a fejlettségi szinttel nő (0%, 38,5%, 80,0%; trendpróba: $p = 0{,}056$), a DFI-ben mért különbség azonban kicsi ($r = 0{,}25$; $p = 0{,}37$).

Az eredmények értelmezésénél figyelembe kell venni a vizsgálat korlátait. A minta kicsi (27 vállalat) és nem reprezentatív, a multinacionális vállalatok felülreprezentáltak. A vállalati értékek egy-egy válaszadó önértékelésén alapulnak, ezért a mért érték a válaszadótól is függhet. A vizsgálat keresztmetszeti, ezért oksági következtetést nem tesz lehetővé. A súlyok normatívak, az érzékenységvizsgálat megmutatja a következtetések súlyfüggését, de nem szünteti meg a súlyválasztásból eredő korlátokat. Az attitűd-komponensek magas, kis szórású értékei plafonhatásra utalnak.

Az index további vizsgálatához és fejlesztéséhez indokolt lehet: nagyobb és rétegzett minta, vállalatonként több válaszadó, külső, objektív mutatókkal végzett validálás, valamint a normatív súlyok összevetése szakértői vagy adatvezérelt súlyozással. Az elvégzett elemzések alapján a következő tézist fogalmaztam meg.

III. TÉZIS - A Digitális Fejlettségi Index kidolgozása és validálása

Kidolgoztam a vállalati digitális fejlettség kérdőíves mérésére szolgáló, nyolc komponensből álló Digitális Fejlettségi Indexet (DFI) és az abból rögzített határértékekkel képzett Digitális Fejlettségi Szintet (DFS). Ezek a digitalizáció stratégiai, technológiai, adaptív és attitűdbeli dimenzióit egységes skálán értékelik, a logisztikai gyakorlatokat pedig szándékosan nem tartalmazzák, így azok magyarázó változójaként alkalmazhatók. Kimutattam, hogy a DFI szerinti rangsor a vizsgált súlyozási változatok mellett robusztus, és az index a vizsgált mintában statisztikailag szignifikáns különbségeket mutat a digitalizációs stratégia stádiumai, a vállalatméret és a tulajdonosi háttér szerinti csoportok között. Az eredmények alátámasztják az index ismert csoportok szerinti érvényességét. [S2, S4, S6, S7]

9. A DIGITALIZÁLT POSTPONEMENT LOGISZTIKAI RENDSZER

9.1. A digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modellje

Az értekezés 6-8. fejezete vállalati szinten vizsgálta a logisztikai rugalmasság, a halasztási stratégia és a digitális fejlettség kapcsolatát. A kérdőíves eredmények a válaszadó vállalatok saját képességeikről alkotott értékelését tükrözik, de a halasztást megvalósító rendszer szerkezetéről és a digitális megoldások konkrét feladatairól nem adnak részletes képet. Ebben az alfejezetben ezért az elemzés fókuszát a vállalati szintről a logisztikai rendszer működésére helyezem át, és bemutatom a digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modelljét. A modell azt írja le, hogy a rendszer milyen elemekből áll, ezek között milyen anyag-, információ- és döntési kapcsolatok állnak fenn, továbbá e kapcsolatok miként teszik lehetővé, hogy a termék végső kialakítása a vevői igény megismeréséig halasztható legyen.

A modell három ponton kapcsolódik az értekezés korábbi részeihez. Egyrészt a 3.2. alfejezet bevezetőjében megfogalmazott központi kérdésre ad szerkezeti választ: megnevezi azokat a mechanizmusokat, amelyeken keresztül a digitális képességek a logisztikai rugalmasságot támogathatják. Másrészt a 3.4. alfejezetben azonosított kutatási hiányhoz kapcsolódik, amely a halasztási stratégia anyag-, információ- és döntési folyamatainak egységes, rendszerszintű leírását érinti. Harmadrészt a 4. fejezet negyedik célkitűzésének első részéhez kapcsolódik, és ezzel működési keretet ad a 9.2. alfejezet matematikai modelljéhez, amely a rendszer operatív döntéseinek egy részét formalizálja.

A modell saját kutatási eredményem, ezért elkülönítem a szakirodalomra épülő elemeket a saját rendszerezésből származó megoldásoktól. Szakirodalmi alapja a halasztott termékdifferenciálás elve (3.2.5. alfejezet), a fizikai folyamatokat a digitális információfeldolgozással és a visszacsatolt irányítással összekapcsoló Ipar 4.0-értelmezés (3.2.2. alfejezet), valamint a digitális képességek hasznosulásának feltételrendszere (3.2.6. alfejezet). Saját hozzájárulásom a szakirodalmi alapokra épülő elemek egységes rendszerezése és alkalmazása a postponement logisztikai rendszerre. Ennek része a fizikai végrehajtás és a digitális irányítás kétrétegű leírása, a logisztikai folyamat öt szakaszának meghatározása, a digitális funkciók és a folyamatszakaszok összerendelése, valamint az erőforrások és működési korlátok tipizálása. A modell ezeket az elemeket visszacsatolt irányítási kapcsolatrendszerbe foglalja, és bemutatja a halasztott differenciálás megvalósításában betöltött szerepüket. Az alfejezet a fogalmi alapok és a rendszerhatár rögzítése után bemutatja a modell szerkezetét, majd részletezi a két réteget, az erőforrásokat és a külső kapcsolatokat. Ezt követi az elemek közötti működési összefüggések elemzése, végül a feltételezések és az érvényességi kör tárgyalása.

9.1.1. Fogalmi alapok és rendszerhatár

Digitalizált postponement logisztikai rendszernek azt a logisztikai rendszert nevezem, amely a közös termékalap és a változatspecifikus anyagok fogadásától a késztermék kiszállításáig terjedő anyagáramot valósítja meg, a termék vevő- és piacspecifikus kialakítását a vevői megrendelés ismeretéig halasztja, és amelynek működését valós idejű adatokra épülő digitális információs és döntéstámogató rendszer irányítja. A meghatározás három, egymástól elkülöníthető követelményt tartalmaz. A logisztikai rendszer megjelölés a vizsgálatot a beérkeztetésre, a tárolásra, az anyagelőkészítésre, a gyártáskiszolgálásra, a végső konfigurálásra és a késztermékkezelésre terjeszti ki. A postponement jelző arra utal, hogy a rendszer felépítése a halasztási stratégiához igazodik: a közös termékalap a lehető legtovább

változatsemleges marad, a változatspecifikus anyagokat pedig a megrendelés alapján rendelik hozzá. A digitalizált jelző pedig többet jelent az események elektronikus rögzítésénél. A 3.2.2. alfejezetben tett megkülönböztetés szerint a rögzítés önmagában csak megfigyelést biztosít, digitalizált rendszerről akkor beszélek, ha az adatok a döntési szinten is hasznosulnak, és a döntés eredménye visszacsatolódik a fizikai folyamathoz.

A digitalizált postponement logisztikai rendszer megnevezést az értekezésben a teljes, kétrétegű rendszerre használom, összhangban a 4. fejezet célkitűzésével. Az 1. réteg a digitális információs és döntéstámogató rendszer, a 2. réteg pedig a fizikai végrehajtási réteg, amely a folyamatszakaszokat, valamint az ezekhez kapcsolódó erőforrásokat és működési korlátokat tartalmazza.

A modell a halasztás 3.2.5. alfejezetben tárgyalt formái közül a formai halasztást, vagyis a késleltetett termékdifferenciálást írja le [P30, P31]. A halasztott tevékenység a termék végső konfigurálása, vagyis az összeszerelés, a vevő- és piacspecifikus konfigurálás, a csomagolás és a címkézés. A modell nem foglal állást abban, hogy a termékkör mekkora részére célszerű halasztást alkalmazni, a részleges postponement [P32] arányát adottságnak tekinti. A halasztás más, így időbeli, térbeli és elosztási formáinak önálló modellezése kívül esik a vizsgálat tárgyán.

A modellt azért nevezem általánosnak, mert a rendszert funkcionális szinten írja le. Elemei szerepek és feladatok, nem konkrét berendezések, alaprajzi elrendezések vagy szoftvertermékek. Egy adott üzem rendszere a modell olyan példánya, amelyben az elemek konkrét tartalmat és paraméterértéket kapnak. Ez a vállalatmodellezésben alkalmazott megkülönböztetéshez kapcsolódik, amely elválasztja az egyedi rendszert leíró modellt egy rendszertípus általános referenciamodelljétől [P58], [P59]. A funkcionális absztrakciót három szempont indokolja. Az empirikus vizsgálat több iparágra és eltérő méretű vállalatokra terjedt ki (6.2. alfejezet), ezért egy iparághoz vagy terméktípushoz kötött leírás korlátozná az eredmények tágabb értelmezését. A 9.2. alfejezet matematikai modellje a rendszer egy részfolyamatát formalizálja, így szükség van egy olyan átfogó keretre, amelyben e részfolyamat helye és határa megadható. Végül a funkcionális leírás teszi lehetővé annak vizsgálatát, hogy ugyanaz a fizikai folyamat eltérő digitális képességek mellett hogyan működtethető. Az általános leírás ugyanakkor nem jelent korlátlan érvényességet: a modell a 3.2.3. alfejezetben tárgyalt referenciaarchitektúrákhoz hasonlóan szerkezetet rögzít, a megvalósítást nem írja elő, érvényességi körét pedig a 9.1.8. alfejezet határolja le. A rendszerhatárt az anyagáram két végpontja jelöli ki. A bemeneti oldalon a beszállító, a kimeneti oldalon a vevő, illetve az elosztóközpont áll. Mindkettő környezeti elem, amelynek belső működését a modell nem írja le, csak a vele folytatott anyag- és információcserét. A határon belül a beérkeztetéstől a kiszállításig terjedő logisztikai folyamat és annak digitális irányítása található. A közös termékalapot létrehozó technológiai folyamat a rendszerhatáron kívül esik, eredménye komponensként vagy félkész termékként lép be a rendszerbe. A végső konfigurálás és az ahhoz kapcsolódó csomagolás viszont önálló folyamatszakaszt alkot. A határon belül a termék végleges konfigurációját kialakító művelet a végső konfigurálás, amely összeszerelést, konfigurálást, csomagolást és címkézést is magában foglalhat. A 2. és a 3. szakasz nevében szereplő gyártás ennek megfelelően a végső konfigurálást végző gyártósorok előkészítésére és kiszolgálására utal, ami megegyezik a 9.2. alfejezet szóhasználatával, ahol a „gyártósor” megnevezés a csomagolósorokat is magában foglalja. Időben a modell az operatív szintre korlátozódik: a gyártási program végrehajtásához kapcsolódó, rövid távú döntéseket írja le, a hálózattervezés, a kapacitásberuházás és a termékszerkezet kialakítása adottság.

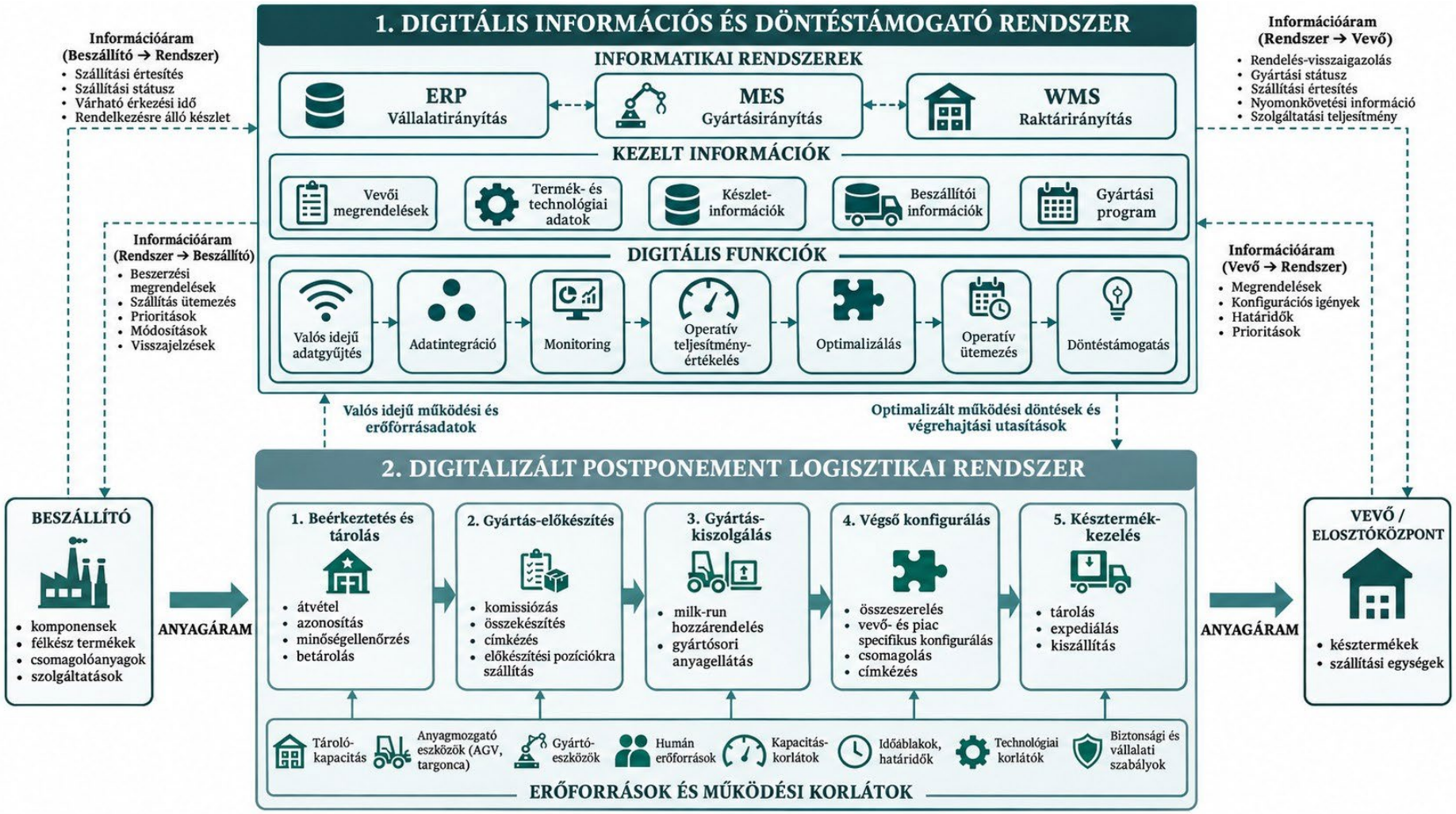
A modell háromféle áramlást különböztet meg. Az anyagáram fizikai tárgyak helyváltoztatása és állapotváltozása: a beszállítótól komponensek, félkész termékek és csomagolóanyagok érkeznek, a vevőhöz pedig késztermékek, illetve szállítási egységek távoznak. Az anyagáram kizárólag a 2. rétegen halad át. Az információáram a rendszer és környezete állapotát leíró adatok és üzenetek továbbítása. Ide tartozik a 2. rétegből az 1. rétegbe irányuló adatfolyam, a környezettel folytatott négy információs kapcsolat, valamint az 1. rétegen belüli adatfeldolgozás. A döntési áram előíró tartalmú információ: a lehetséges változatok közül egyet kijelöl és a végrehajtó számára feladatot vagy előírást határoz meg. Ilyen az 1. rétegből a 2. rétegbe irányuló kapcsolat, valamint a beszállító felé küldött megrendelés és prioritás. A megkülönböztetés alapja tehát a tartalom, nem a hordozó: a 33. ábra a döntési áramot az információárammal azonos vonaltípussal jelöli, hatása azonban eltér, mert az információ a döntési helyzetet írja le, a döntés pedig a fizikai folyamat módosítására irányul. E hármas tagolás felel meg a 3.4. alfejezetben megnevezett anyag-, információ- és döntési folyamatoknak.

9.1.2. A modell szerkezete

A modell szerkezetét a 33. ábra mutatja be. A modell két, egymás fölött ábrázolt rétegből és a hozzájuk kapcsolódó környezeti elemekből áll. A felső réteg, az 1. Digitális információs és döntéstámogató rendszer három elemcsoportot tartalmaz: az informatikai rendszereket, a kezelt információkat és a digitális funkciókat. Az alsó réteg, a 2. Digitalizált postponement logisztikai rendszer feliratú végrehajtási réteg öt folyamatszakaszból, valamint a működésüket befolyásoló erőforrásokból és korlátokból épül fel. A környezetet a bal oldalon a beszállító, a jobb oldalon a vevő, illetve az elosztóközpont képviseli.

A 33. ábra vízszintes irányban az anyagáramlást, függőleges irányban az irányítási kapcsolatot szemlélteti. Az anyagáram a beszállítótól az öt folyamatszakaszon át a vevőig halad, és csak a 2. réteget érinti. A beszállító komponenseket, félkész termékeket és csomagolóanyagokat biztosít, az esetleges kiegészítő szolgáltatásokat a modell nem részletezi. A környezettel folytatott négy információáram ezzel szemben az 1. réteghez kapcsolódik. A modellben ez azt jelenti, hogy a partnerek a rendszerrel annak információs rétegén keresztül kommunikálnak, a fizikai réteghez pedig az anyagáram révén kapcsolódnak. A két réteget két ellentétes irányú kapcsolat köti össze: felfelé a valós idejű működési és erőforrásadatok, lefelé a működési döntésekből származó végrehajtási utasítások jutnak el.

A kétrétegű felépítés a kiberfizikai rendszerek szemléletét követi, amelyben a fizikai folyamat érzékelése számítási, kommunikációs és beavatkozási funkciókkal kapcsolódik össze [P13]. A rétegek szétválasztását az értekezés kérdésfeltevése indokolja. Ha a fizikai folyamat és a digitális irányítás egyetlen folyamattérképen jelenne meg, nehezebben különíthető el az erőforrások és az információfelhasználás szerepe a rendszer alkalmazkodóképességében. A szétválasztás ezt a megkülönböztetést támogatja, és összekapcsolja az értekezés két mérési szintjét: a Digitális Fejlettségi Index (8. fejezet) az 1. réteghez kapcsolódó digitális képességek vállalati hátterét jellemzi, a logisztikai rugalmasság dimenziói (3.2.4. alfejezet) pedig a 2. réteg működésében vizsgálhatók. A következő alfejezetek a két réteget, az erőforrásokat és a külső kapcsolatokat külön tárgyalják, az összefüggéseket pedig a 9.1.7. alfejezet elemzi.



33. ábra: A digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modellje

A modell a termelési és logisztikai végrehajtás, valamint a digitális döntéstámogatás vertikális összekapcsolására összpontosít. A szervezetközi kapcsolódásokat a beszállítói és vevői információáramok jelenítik meg. A kétrétegű felosztás a saját működési modell absztrakciója, ezért a RAMI 4.0 hat architekturális rétegével nem feleltethető meg egy az egyben. A termék teljes életciklusának digitális integrációja kívül esik a modell vizsgálati körén.

9.1.3. A digitális információs és döntéstámogató rendszer

Az 1. réteg feladata, hogy a rendszer állapotáról egységes állapotképet állítson elő, és erre építve támogassa a végrehajtható döntések meghozatalát. A három elemcsoport a következő kérdéseket rendezi: mely rendszerek hordozzák az adatokat, mely információkra épülnek a döntések és milyen feldolgozási lépések vezetnek az adattól az utasításig.

9.1.3.1. Informatikai rendszerek

A modell három informatikai rendszerkategóriát különböztet meg, amelyek feladatai a kezelt objektumok és a tervezési, illetve végrehajtási időhorizont alapján értelmezhetők. A vállalati erőforrás-tervezési rendszer (ERP, a 33. ábrán funkciója szerint: Vállalatirányítás) a kereskedelmi és tervezési szintet képviseli: itt jelennek meg a vevői megrendelések, innen indulnak a beszerzési megrendelések és itt találhatók a vállalati törzsadatok. A termelésvégrehajtási rendszer (MES, a 33. ábrán: Gyártásirányítás) a gyártási rendelések gyártósori végrehajtását és visszajelentését kezeli. A raktárirányítási rendszer (WMS, a 33. ábrán: Raktárirányítás) a tárolóhelyeket, a tárolóhely szintű készletet és a raktári feladatokat tartja nyilván. A munkamegosztás az IEC 62264-1:2013 szabvány [P60] funkcionális hierarchiájához igazodik, amelyben a vállalati szint (4. szint) és a gyártásműveleti irányítás (3. szint) elkülönül, az előbbit jellemzően az ERP, az utóbbit az MES valósítja meg [P61]. A szabványsorozat 3. része a 3. szint feladatai közé sorolja a termelés részletes ütemezését, a feladatok kiadását, a végrehajtás követését és a teljesítmény elemzését, valamint a belső készletek és anyagmozgások kezelését is (IEC 62264-3:2016) [P62]. A modellben ennek megfelelően a gyártási program és a sorrend tervezését, a folyamatok és a teljesítmény követését, valamint az eltérések eszkalációját az MES-hez kapcsolódó funkciókként kezelem, a belső anyagellátás vezérlése pedig az MES és a WMS kapcsolatán keresztül valósul meg.
A 33. ábrán szereplő három rendszer rendszerkategóriát jelöl, nem szoftverterméket, összhangban a 9.1.1. alfejezetben rögzített funkcionális absztrakcióval. Halasztásra épülő működésben a gyártás végrehajtása és a belső logisztika közötti operatív koordináció különösen szoros időbeli összehangolást igényel, mert a késői differenciálás miatt a gyártási program változása rövid időn belül komissiózási és anyagellátási feladatokká alakul. Ezt a koordinációt a modell nem önálló rendszerként, hanem a 9.1.3.3. alfejezetben bemutatott digitális funkciók láncaként írja le: a folyamat- és teljesítménykövetés a monitoring és az operatív teljesítményértékelés, az anyagellátás vezérlése az optimalizálás és az operatív ütemezés, az eltérések eszkalációja a döntéstámogatás funkciójában jelenik meg. E funkciók hordozója vállalatonként eltérhet: megvalósulhatnak az MES vagy a WMS bővített feladatköreként, önálló tervező-ütemező rendszerben (Advanced Planning and Scheduling, APS) vagy egyedi fejlesztésű szoftverben. A modell szempontjából a funkciók megléte a meghatározó, az, hogy ezeket mely alkalmazások valósítják meg, az adott üzem modellpéldányában rögzíthető.
A 33. ábra a három rendszert kétirányú nyilakkal kapcsolja össze. A kétirányúság arra utal, hogy az egyes rendszerek adatot szolgáltatnak és fogadnak is: az ERP-ben rögzített megrendelés alapján az MES gyártási programot, a WMS pedig anyagellátási feladatokat kezel,

a végrehajtás adatai pedig ellenkező irányban frissítik a készletet és a rendelés állapotát. A33. ábrán a nyilak a szomszédos rendszerpárokat kötik össze, ez azonban nem kötelező interfésztopológiát, hanem a rendszerek összekapcsoltságát jelöli. A követelmény tartalma a 3.2.6. alfejezetben tárgyalt interoperabilitás: a rendszereknek a továbbított adatot azonos jelentéssel kell kezelniük [P36]. Az összekapcsolás gyakorlati haszna, hogy a rendelési igény a készlet és a végrehajtás adataival együtt értékelhető, ami a termelés és a logisztika szinkronizálásának előfeltétele [P16].

9.1.3.2. Kezelt információk

Az 1. réteg öt információs objektumot kezel: a vevői megrendeléseket, a termék- és technológiai adatokat, a készletinformációkat, a beszállítói információkat és a gyártási programot. Ezek alkotják azt az alapvető információkészletet, amelyre a halasztott differenciálás döntései támaszkodnak. A vevői megrendelés rögzíti az előállítandó terméket és a teljesítési határidőt. A termék- és technológiai adat azt, hogy ehhez milyen anyagok és milyen technológiai képességű gyártósorok szükségesek. A készlet- és beszállítói információk az anyag aktuális, illetve várható rendelkezésre állását, a gyártási program pedig a végső konfigurálás tervezett kezdését írja le. Ha bármelyik objektum hiányzik vagy elavult, a döntés megalapozottsága a többi adat pontossága ellenére is sérülhet. A 16. táblázat mindegyik objektumhoz megadja a forrást, a gazdarendszert, vagyis azt a rendszert, amely a mérvadó változatot kezeli, valamint a legfontosabb felhasználókat.
A táblázat utolsó oszlopa az információk eltérő jellegét és változási ütemét mutatja be. A termék- és technológiai adatok törzsadatok, amelyek ritkán változnak, hibájuk azonban minden rájuk épülő döntésben megismétlődik. A vevői megrendelések és a gyártási program tranzakciós, illetve tervadatok, amelyek módosulása a halasztás lényegéhez tartozik. A készlet- és beszállítói információk állapotadatok, amelyek változása a fizikai eseményekhez, illetve a partneri visszajelzésekhez kötődik. A valós idejűség követelménye ezért objektumonként eltér és a 3.2.6. alfejezet megállapításával összhangban a szükséges reakcióidőhöz kell viszonyítani.

Kezelt információ	Forrás	Gazda-rendszer	Fő felhasználó	Jelleg
Vevői megrendelések	vevő (Vevő → Rendszer információáram)	ERP	MES (gyártási program), optimalizálás, operatív ütemezés	tranzakciós adat
Termék- és technológiai adatok	belső törzsadat-karbantartás	ERP (termék szerkezet), MES (technológiai adatok)	WMS (komissiózás), MES (végső konfigurálás), optimalizálás	törzsadat
Készletinformációk	a 2. réteg eseményei (átvétel, betárolás, komissiózás, felhasználás)	WMS	optimalizálás, operatív ütemezés, beszállítói kapcsolat	állapotadat
Beszállítói információk	beszállító (Beszállító → Rendszer információáram)	ERP	WMS (beérkeztetés), MES (anyagrendelkezésre állás)	állapotadat

16. táblázat: Az 1. réteg kezelt információi: forrás, gazdarendszer és felhasználó

A készletinformáció tekintetében a 3.2.2. alfejezetben jelzett megkülönböztetés a döntő: a fizikailag jelen lévő, a rendeléshez már lefoglalt és a ténylegesen felhasználható készlet szétválasztása nélkül ugyanaz a szabad készlet több rendeléshez is lefoglalhatóvá válhat. A

gyártási program helyzete sajátos: az 1. réteg egyszerre kezeli információként és használja a döntések kiindulópontjaként, a 9.2. alfejezet modelljében a rendelések tervezett kezdési időpontjai ennek megfelelően bemenő paraméterek.

9.1.3.3. Digitális funkciók

A 33. ábra hét digitális funkciót kapcsol össze: valós idejű adatgyűjtés, adatintegráció, monitoring, operatív teljesítményértékelés, optimalizálás, operatív ütemezés és döntéstámogatás. Az ábra nyilai a funkciók adat- és döntésfeldolgozási kapcsolatainak logikai sorrendjét szemléltetik. A konkrét megvalósításban az egyes funkciók részben párhuzamosan vagy ismétlődően is működhetnek, az optimalizálás és az operatív ütemezés pedig integrált feladatként is megoldható. A valós idejű adatgyűjtés a 2. réteg eseményeit, vagyis az azonosítások, státuszváltások és erőforrás-állapotok jelzéseit időbélyeggel ellátott eseményrekordokká alakítja. Az adatintegráció ezeket a három informatikai rendszerből származó adatokkal egyesíti és az ugyanarra az objektumra vonatkozó adatokból egységes állapotleírást készít. A monitoring ebből állítja elő a rendelések, a készletek, a feladatok és az erőforrások pillanatnyi helyzetét. Az operatív teljesítményértékelés a helyzetet a tervvel és a célértékekkel veti össze, eredménye a mutatók értéke és a feltárt eltérések köre. Ilyen mutató lehet a határidőre teljesített logisztikai feladatok aránya vagy az átlagos logisztikai reakcióidő, amelyeket a 9.2.2. alfejezet LF1 és LF2 jelöléssel formalizál.
Az optimalizálás és az operatív ütemezés az aktuális állapot és a működési feltételek alapján végrehajtási javaslatokat állít elő. Az optimalizálás bemenete a nyitott rendelések halmaza, az aktuális állapot, valamint az erőforrások és a korlátok. Kimenete annak meghatározása, hogy mely rendelések teljesíthetők, és ezek mely gyártósorokhoz, illetve erőforrásokhoz rendelhetők. Az operatív ütemezés a hozzárendelésekből időben rendezett feladatsort képez: meghatározza a logisztikai feladatok sorrendjét és időpontját. A két funkció eltérő feladatot lát el: az első a kiválasztást és a hozzárendelést, a második az időzítést támogatja, még ha a 9.2. alfejezet modellje egyetlen feladatban oldja is meg őket. Az operatív ütemezés hatóköre a logisztikai feladatokra terjed ki, és a gyártási programból átvett tervezett kezdési időpontokat bemenő adatként kezeli [S1]. A döntéstámogatás a végrehajtási javaslatok és következményeik értékelését, valamint a döntési jogosultságoknak megfelelő választást segíti. A kiválasztott javaslatból emberi jóváhagyást követően vagy előre meghatározott szabályok alapján automatikusan válhat a 2. rétegnek kiadott utasítás. A funkcionális rendet az indokolja, hogy az egyes funkciók a döntéshez szükséges információk előállításának és felhasználásának eltérő feladatait látják el. A megalapozott operatív döntéshez az aktuális állapot ismeretére, az adatok összehangolására és a végrehajtási lehetőségek értékelésére egyaránt szükség van. Az adatgyűjtés a bekövetkezett eseményeket rögzíti, az adatintegráció pedig összehangolja a különböző források azonos objektumra vonatkozó adatait. A monitoring a folyamat aktuális helyzetét mutatja meg, az értékelés pedig a tervhez és a célértékekhez viszonyítja azt. Az optimalizálás a megvalósítható alternatívákat értékeli, az operatív ütemezés a sorrendet és az időzítést határozza meg, a döntéstámogatás pedig segíti a megfelelő változat kiválasztását. Ha az optimalizálás integrálatlan adatokon fut, akkor a 3.2.2. alfejezet megállapítása szerint a gyors adatátadás is hibás anyagellátási döntést támogathat. Ez a funkcionális rend rokon a technológiák 3.2.2. alfejezetben követett, funkció szerinti értelmezésével [P14] és az acatech érettségi keretének fejlődési szintjeivel, amelyben a láthatóság megelőzi az átláthatóságot, az pedig az alkalmazkodóképességet [P1, P21]. A megfeleltetés azonban nem teljes: a modell funkciói egy működő rendszer funkcionális összetevői, nem fejlettségi fokozatok. Működésük

a feladattól függően folyamatos, eseményvezérelt vagy időszakos lehet. Az adatokból közvetlenül döntési javaslatot előállító lépés a szakirodalomban előíró elemzésként is megjelenik [P63].
A digitális funkciók értelmezéséhez két szempontot szükséges tisztázni. A modell a döntések automatizáltságának mértékét nyitva hagyja: az utasítások kiadása a kialakított döntési jogosultságok szerint emberi jóváhagyással vagy előre meghatározott szabályok alapján automatikusan történhet. Az eltérések kezelése és szükség szerinti eszkalációja a döntéstámogatáshoz kapcsolódik. Ez megfelel a szociotechnikai megközelítésnek, amely szerint a technikai rendszer és a szervezeti döntési rend együtt határozza meg a működést [P33]. Az ábra az áttekinthetőség érdekében nem részletezi a digitális funkciók közötti belső visszacsatolásokat és az ismételt döntés-előkészítést. A két réteg közötti visszacsatolást a fizikai végrehajtásról visszaérkező adatok biztosítják, amelynek működését a 9.1.7. alfejezet részletezi.

9.1.4. A folyamatszakaszok

A 2. réteg az anyagáramot öt folyamatszakaszra bontja. A szakaszokat az anyag logisztikai állapotának változása alapján határoltam le: a beszállítói szállítmányból felhasználható készlet, abból rendeléshez rendelt anyagegység, majd gyártósor mellett rendelkezésre álló anyag, késztermék és végül szállítási egység lesz. A szakaszokat azonos szempontok szerint mutatom be: cél, tevékenységek, be- és kimenet, információigény, döntési pontok, igénybe vett erőforrások, valamint a halasztásban betöltött szerep.

Folyamat-szakasz	Bemenet → kimenet	Információ-igény (elsődleges rendszer)	Döntési pontok	Erő-források	Szerep a halasztásban
1. Beérkeztetés és tárolás	beszállítói szállítmány → szabad készlet a tárolóhelyen	beszállítói információk, készlet-információt hoz létre (WMS, ERP)	átvételi sorrend, elfogadás vagy visszautasítás, tárolóhely kijelölése	tárolókapacitás, anyagmozgató eszközök, humán erőforrások	készletpont: változat-semleges készlet
2. Gyártás-előkészítés	szabad készlet → rendeléshez rendelt, felcímkézett egység az előkészítési pozíción	gyártási program, termék- és technológiai adatok, készletinformációk (MES, WMS)	készlet lefoglalása, **feladatkiadás** időpontja, komissiózási sorrend	humán erőforrások, anyagmozgató eszközök, tárolókapacitás	lekötési pont: az anyag rendeléshez kötődik, a termékalap változatlan
3. Gyártáskiszolgálás	előkészített egység → anyag a gyártósor mellett	gyártási program, nyitott logisztikai feladatok, soroldali készlet (MES, WMS)	feladatok milk-run körhöz rendelése, sorrend, indítási időpont	**anyagmozgató** eszközök (AGV, targonca), humán erőforrások, **tárolókapacitás**	a rendelés és a konfigurálás közötti idő fel-használása
4. Végső konfigurálás	közös termékalap, **változatspecifikus** komponensek, csomagolóanyag → késztermék	vevői megrendelések, termék- és technológiai adatok, gyártási program (MES, ERP)	rendelés gyártósorhoz rendelése	**gyártóeszközök,** humán erő-források	**differenciálási pont:** változatspecifikus kialakítás, amelynek módosítása **többletmunkát** igényelhet
5. Késztermékkezelés	késztermék → **rendszerhatárt átlépő** szállítási egység	vevői megrendelések (határidő, prioritás), szállítási értesítést hoz létre (WMS, ERP)	szállítási egységek képzése, kiszállítási sorrend és időzítés	tárolókapacitás, anyagmozgató eszközök, humán erőforrások	rendeléshez kötött, rövid idejű tárolás

17. táblázat: A 2. réteg folyamatszakaszainak összefoglaló jellemzése

9.1.4.1. Beérkeztetés és tárolás

Az első szakasz célja, hogy a beszállítótól érkező anyagból azonosított, ellenőrzött és felhasználható készlet váljon. Tevékenységei az átvétel, az azonosítás, a minőségellenőrzés és a betárolás. Bemenete a beszállítói szállítmány, kimenete a tárolóhelyen lévő szabad készlet. A szakasz a beszállítói információkra támaszkodik, mert a szállítási értesítés és a várható érkezési idő ismeretében az átvétel előre tervezhető, működése során pedig a készletinformációt hozza létre. Döntési pontjai az átvétel sorrendje, a minőségellenőrzés alapján az elfogadás vagy a visszautasítás, valamint a tárolóhely kijelölése. Erőforrásai a tárolókapacitás, az anyagmozgató eszközök és a humán erőforrások. A halasztás szempontjából ez a szakasz a közös termékalap változatsemleges készletének tárolási pontja: a közös termékalap és a változatspecifikus anyagok itt még egyetlen rendeléshez sem kötődnek, így a közös termékalap készlete több termékváltozat előállítására is felhasználható. Az azonosítás egyúttal az első adatgyűjtési pont, ettől kezdve az anyag mozgása a digitális rétegben is követhető.

9.1.4.2. Gyártás-előkészítés

A második szakasz célja, hogy a gyártási programban szereplő rendelésekhez szükséges anyagok rendelésenként összeállítva, időben rendelkezésre álljanak. Tevékenységei a komissiózás, az összekészítés, a címkézés és az előkészítési pozíciókra szállítás. Bemenete a szabad készlet, kimenete az előkészítési pozíción álló, rendeléshez rendelt és azonosítóval ellátott anyagegység. Információigénye több adatforrást érint: a gyártási program megadja az időpontot, a termék- és technológiai adat a változathoz tartozó anyagok körét, a készletinformáció a kiszedés helyét. Döntési pontjai a készlet lefoglalása, a feladatok kiadásának időpontja és a komissiózási sorrend, elsődleges erőforrásai a humán erőforrások, az anyagmozgató eszközök és az előkészítési pozíciók tárolókapacitása. A halasztás szempontjából itt jelenik meg először a vevői rendelés fizikai következménye: a változatspecifikus anyagok kiválasztásával az anyag lekötötté válik, a közös termékalap azonban még változatlan. A lekötés visszafordítható, szükség esetén azonban a 2. fejezetben bemutatott módon ismételt anyagmozgatást igényelhet. A címkézés ebben a szakaszban belső azonosító címke elhelyezését jelenti, amely az összekészített egységet a rendeléshez és a célgyártósorhoz rendeli.

9.1.4.3. Gyártáskiszolgálás

A harmadik szakasz célja, hogy az előkészített anyag a felhasználás időpontjára a gyártósor mellé érkezzen. Fő tevékenysége az előkészített anyagok gyártósorhoz szállításának szervezése és végrehajtása. Ennek egyik megvalósítási módja a milk-run, vagyis a több kiszolgálási helyet egy körben érintő, ismétlődő belső anyagellátási járat, amelynek útvonal- és időtervezése a kevert modellű szerelősorok ellátásának ismert feladata [P64]. Bemenete az előkészítési pozíción álló anyagegység, kimenete pedig a gyártósor mellett rendelkezésre álló anyag. Információigénye a gyártási programból származó kezdési időpontokra, a nyitott logisztikai feladatok listájára és a soroldali készletre terjed ki. Döntési pontjai megegyeznek a 9.2. alfejezet második döntési szintjével: mely feladat mely milk-run körbe kerüljön, milyen sorrendben és a kör mikor induljon. Erőforrásai az anyagmozgató eszközök (targonca, AGV vagy AMR), a humán erőforrások és a soroldali tárolókapacitás. A halasztás szempontjából ez a szakasz használja fel azt az időt, amely a rendelés megismerése és a végső konfigurálás kezdete között rendelkezésre áll. A 3.2.5. alfejezet szerint minél későbbi a változatspecifikus döntés, annál

rövidebb ez az idő, ezért a gyártáskiszolgálás reakcióideje közvetlenül korlátozza, hogy a döntés meddig halasztható. A 9.2. alfejezet a szakaszt tovább részletezi és a kiszállítási feladatok mellett visszaszállítási feladatokat is kezel.

9.1.4.4. Végső konfigurálás

A negyedik szakasz célja, hogy a közös termékalapból a megrendelésnek megfelelő késztermék jöjjön létre. Tevékenységei az összeszerelés, a vevő- és piacspecifikus konfigurálás, a csomagolás és a címkézés. A 9.1.1. alfejezetben rögzítettek szerint a rendszerhatáron belül ebben a szakaszban történik a termék változatspecifikus kialakítása. Bemenete a gyártósor mellett rendelkezésre álló közös termékalap, a változatspecifikus komponensek és a csomagolóanyag, kimenete a konfigurált, csomagolt és felcímkézett késztermék. Információigényét a vevői megrendelés konfigurációs igényei, a termék- és technológiai adatok és a gyártási program adják. Döntési pontja a rendelés gyártósorhoz rendelése a technológiai alkalmasság figyelembevételével, ami a 9.2. alfejezet első döntési szintje. Erőforrásai a gyártóeszközök és a humán erőforrások. A halasztás szempontjából ez a szakasz a differenciálási pont: a termék itt nyeri el végleges, változatspecifikus kialakítását. A címkézés itt a termék és a csomagolás vevő- és piacspecifikus jelölését jelenti, tehát maga is a differenciálás része, szemben a második szakasz belső azonosító címkéjével. A szakasz tartalma összhangban áll a 7.3. alfejezet eredményével, amely szerint a halasztást alkalmazó válaszadók azt leggyakrabban a termék-végszerelésnél és a csomagolásnál használják (22/a ábra) [S2].

9.1.4.5. Késztermékkezelés

Az ötödik szakasz célja, hogy a késztermék szállítási egységként, a vállalt határidőre eljusson a vevőhöz vagy az elosztóközpontba. Tevékenységei a tárolás, az expediálás és a kiszállítás. Bemenete a késztermék, kimenete a rendszerhatárt átlépő késztermék és szállítási egység. Információigényét a megrendelés határideje és prioritása határozza meg, a szakasz pedig a vevő felé irányuló szállítási értesítés és nyomon követési információ forrása. Döntési pontjai a szállítási egységek képzése, valamint a kiszállítások sorrendje és időzítése. Erőforrásai a tárolókapacitás, az anyagmozgató eszközök és a humán erőforrások, meghatározó korlátja a szállítási időablak. A késztermék tárolása más célt szolgál, mint az első szakasz változatsemleges készletezése. Ott a változatsemleges készlet a keresleti bizonytalanság felfogására szolgál és időtartamát a beszerzési döntések határozzák meg. Itt a késztermék már ismert rendeléshez tartozik, a tárolás a kiszállításig tartó várakozás, amelynek időtartama a halasztás működésének egyik jellemzője. Ha a késztermék tartósan a rendszerben marad, arra utalhat, hogy a differenciálás a szükségesnél korábban történt, így a halasztás készletkockázati előnye csökkent.

9.1.5. Erőforrások és működési korlátok

A 2. réteg alsó sávja nyolc elemet tartalmaz, amelyek a 33. ábra szerint mind az öt folyamatszakaszra hatnak. A felsorolás erőforrásokat és működési korlátokat egyaránt tartalmaz, amelyeket az értelmezés során elkülönítek. Erőforrásnak azt az elemet tekintem, amelyet a tevékenységek igénybe vesznek és amelynek rendelkezésre állása időben véges. Ide tartozik a tárolókapacitás, az anyagmozgató eszközök köre, amelyre a 33. ábrán a vezető nélküli szállítójármű (Automated Guided Vehicle, AGV) és a targonca szolgál példaként, a

gyártóeszközök és a humán erőforrások. Működési korlátnak azt a feltételt tekintem, amely a megengedett döntések körét szűkíti. Ide tartoznak a kapacitáskorlátok, az időablakok és határidők, a technológiai korlátok, valamint a biztonsági és vállalati szabályok. A tárolókapacitás megnevezése szerint kapacitás, tartalma szerint azonban a tárolóhelyek által nyújtott erőforrás, ezért az első csoportba sorolom.
A négy korlát négy különböző típust képvisel. A kapacitáskorlát mennyiségi: azt rögzíti, hogy egy erőforrás egy időszakban legfeljebb mekkora terhelést vehet fel, tehát az erőforrások végességéből származik és azokkal együtt változik. Az időablak és a határidő időbeli korlát, amely a tevékenység megengedett kezdetét és befejezését jelöli ki. A technológiai korlát megengedhetőségi jellegű: azt határozza meg, hogy egy anyag, termékváltozat vagy művelet mely erőforrással párosítható. A biztonsági és vállalati szabály normatív korlát, amely a műszakilag lehetséges megoldások közül zár ki egyeseket. A korláttípusok érvényesítésének módja is eltér. A modellben a technológiai korlátok és a biztonsági szabályok kötelezők, egyes határidők túllépése viszont késedelemként megjelenhet a teljesítményben. A kapacitáskorlát egy adott döntési időablakon belül kötött, hosszabb távon azonban az erőforrások bővítésével módosítható. A tipizálás saját rendszerezésem, amelyet a 18. táblázat foglal össze, megadva azt is, hogy az egyes elemek a 9.2. alfejezet matematikai modelljében mely paraméterként jelennek meg.

Elem	**Típus**	**Jelleg**	**Megjelenés a 9.2. alfejezet modelljében**
Tároló kapacitás	erőforrás	véges befogadóképességű tárolóhely	C_l soroldali tároló-kapacitás, B_{lt} soroldali készletszint
Anyagmozgató eszközök (AGV, targonca)	erőforrás	véges számú, időben lekötött eszköz	H anyagkiszállító erő-források száma, K milk-run körök halmaza
Gyártó eszközök	erőforrás	véges számú gyártósor	L gyártósorok halmaza, p_{rl} feldolgozási idő
Humán erőforrások	erőforrás	véges létszám és kompetencia	önálló paraméterként nem szerepel
Kapacitás korlátok	korlát, mennyiségi	az erőforrások terhelhetőségének felső határa	gyártósoronként egy aktív rendelés, körönként legfeljebb N^+ és N^- feladat, legfeljebb H kör, a soroldali készlet legfeljebb C_l
Időablakok, határidők	korlát, időbeli	megengedett kezdés és befejezés	d_r határidő, t_r^0 tervezett kezdés, e_f kiadási és b_f legkésőbbi teljesítési időpont
Technológiai korlátok	korlát, megengedhető ségi	megengedett termék erőforrás párosítás	A_{rl} technológiai alkalmasság
Biztonsági és vállalati szabályok	korlát, normatív	előírásból eredő tilalom vagy követelmény	η_{min} és E_{max} szolgáltatási szintre vonatkozó előírás, biztonsági szabály nem szerepel

18. táblázat: Az erőforrások és működési korlátok tipizálása és megjelenésük a 9.2. alfejezet modelljében

A korlátok együtt határozzák meg a megengedett döntések halmazát: csak az a megoldás fogadható el, amely valamennyi kötelező feltételt teljesíti. Ebből két következmény adódik. Az

egyik, hogy a teljesíthető volument a kötött korlátok és azok együttes hatása korlátozza, így egy nem kötött korlát lazítása önmagában nem feltétlenül növeli a teljesíthető rendelési volument. A másik, hogy egyes erőforrásokat több folyamatszakasz is igénybe vesz. A humán erőforrások és az anyagmozgató eszközök a beérkeztetésben, az előkészítésben, a gyártáskiszolgálásban és a késztermékkezelésben egyaránt megjelennek, ezért az egyik szakaszban hozott döntés megváltoztatja a másikban rendelkezésre álló kapacitást. A33. ábrán a sávból mind az öt szakaszhoz vezető nyíl ezt az összekapcsoltságot fejezi ki és ez indokolja, hogy a döntéseket az 1. rétegben a folyamatszakaszok együttes figyelembevételével készítsék elő. A sáv az 1. tézis egyik megállapításának modellbeli értelmezését is segíti: a 6. fejezet eredményei szerint a válaszadók a logisztikai rugalmasság fejlesztésének fő akadályát az erőforrások hiányában látják, a modellben pedig a kapacitáskorlát az a csatorna, amelyen keresztül az erőforráshiány a teljesíthető volument korlátozza.

9.1.6. Külső kapcsolatok

A rendszer a környezetével az anyagáramon kívül négy információáramon keresztül érintkezik, amelyek az 1. réteghez kapcsolódnak. A 33. ábra feliratain a „Rendszer” megjelölés ezt a réteget jelenti. A négy áram oldalanként egy befelé és egy kifelé irányuló kapcsolatból áll, tartalmukat és szerepüket a 19. táblázat foglalja össze. A befelé irányuló kapcsolatok a partnerek igényeiről és állapotáról, a kifelé irányulók pedig a rendszer döntéseiről és teljesítéséről közvetítenek információt.

Információ-áram	Tartalom	Kapcsolódó kezelt információ	Szerep
Beszállító → Rendszer	szállítási értesítés, szállítási státusz, várható érkezési idő, rendelkezésre álló készlet	beszállítói információk	az anyag jövőbeni rendelkezésre állásának ismerete, a beérkeztetés tervezése
Rendszer → Beszállító	beszerzési megrendelések, szállítási ütemezés, prioritások, módosítások, visszajelzések	készlet információk, gyártási program	az utánpótlás igazítása a tényleges felhasználáshoz
Vevő → Rendszer	megrendelések, konfigurációs igények, határidők, prioritások	vevői megrendelések	a halasztott döntéshez szükséges információ belépése
Rendszer → Vevő	rendelés-visszaigazolás, gyártási státusz, szállítási értesítés, nyomon követési információ, szolgáltatási teljesítmény	vevői megrendelések, gyártási program	vállalás és átláthatóság a vevő felé

19. táblázat: A rendszer külső információáramai

A vevőtől érkező információ a halasztás szempontjából meghatározó: a megrendelés a mennyiséget, a konfigurációs igény a változatot, a határidő és a prioritás pedig a teljesítés időbeli feltételeit rögzíti. A rendszerből a vevőhöz irányuló áram elemei a rendelés életútját követik a visszaigazolástól a szállítási értesítésig. A rendelés-visszaigazolás vállalás, amelynek megalapozottsága attól függ, hogy az 1. réteg meg tudja-e állapítani a rendelés teljesíthetőségét az adott erőforrások mellett, és ennek mennyiségi oldalát pedig a 9.2. alfejezet első célfüggvénye vizsgálja. A gyártási státusz a rendszerhatár 9.1.1. alfejezetben rögzített értelmezése szerint a végső konfigurálás előrehaladását jelenti. A szolgáltatási teljesítmény az operatív teljesítményértékelés eredményének a vevővel megosztott része.

A beszállítói oldalon a befelé irányuló áram a beérkeztetés tervezhetőségét és az anyagrendelkezésre állás előzetes ismeretét szolgálja. A kifelé irányuló áram elemei közül a beszerzési megrendelés, a szállítási ütemezés, a prioritás és a módosítás döntési jellegű információ, mivel a beszállító tevékenységét befolyásolják. A visszajelzés a beszállítói teljesítés értékelését közli. A beszállítói és vevői kapcsolatok együttesen mutatják meg a halasztás egyik feltételét: a késői differenciálás a késztermék összetételéhez kötődő kockázatot csökkenti, a közös termékalap és a változatspecifikus anyagok utánpótlását azonban továbbra is előre kell megszervezni (3.2.5. alfejezet). A tényleges keresleti és készletadatok megosztása mérsékelheti a rendelési jelek torzulását a lánc korábbi szakaszai felé [P5], haszna azonban az alkalmazott rendelési szabályoktól is függ (3.2.1. alfejezet). Mivel a partnerek a rendszer működéséről megosztott információkat az 1. rétegen keresztül kapják meg, a megosztott adat minősége a külső kapcsolatok megbízhatóságát is meghatározza [P35].

9.1.7. A modell elemei közötti összefüggések

Az eddig egyenként bemutatott elemek a köztük lévő kapcsolatok révén alkotnak működő rendszert. A következő öt összefüggés a modell működési mechanizmusait írja le, és kijelöli a 9.2. alfejezet matematikai formalizálásának kapcsolódási pontjait.

9.1.7.1. A két réteg közötti zárt szabályozási kör

A két réteg közötti adat- és utasításáramlás visszacsatolt irányítási kört alkot. A 2. réteg a szabályozott folyamat, az 1. réteg a szabályozó, a célértékeket a vevői megrendelések határidői és a gyártási program határozzák meg, a zavaró hatásokat pedig a rendelésmódosítások, a beszállítói késések és az erőforrás-kiesések jelentik. Egy szabályozási ciklus során a fizikai események adatai a digitális rétegbe kerülnek, ahol az érintett funkciók feldolgozzák és értékelik azokat, majd szükség esetén új végrehajtási javaslat készül. A döntési jogosultságoknak megfelelően kiválasztott javaslat utasításként jut vissza a fizikai végrehajtási rétegbe, végrehajtása pedig új eseményeket hoz létre. A 33. ábrán a felfelé mutató nyíl az adatgyűjtéshez, a lefelé mutató nyíl a döntéstámogatáshoz csatlakozik. Ez az elrendezés a két réteg közötti irányítási kapcsolatot szemlélteti, a digitális rétegen belüli ismételt feldolgozást és visszacsatolásokat nem részletezi. A kör zárását a végrehajtásról visszaérkező működési és erőforrásadatok biztosítják.

A kör egyik meghatározó jellemzője a ciklusideje, vagyis az esemény bekövetkezése és a rá adott utasítás végrehajtása között eltelt idő. A ciklusidőt az adat rendelkezésre állásának késedelme, az adott döntéshez szükséges feldolgozás és döntés-előkészítés időigénye, az esetleges emberi jóváhagyás, valamint az utasítás végrehajtásának ideje határozza meg. Párhuzamosan működő funkciók esetén a feldolgozási időket az egymástól való függésük figyelembevételével kell értelmezni. A beavatkozás akkor hajtható végre időben, ha a ciklusidő nem haladja meg az érintett döntéshez rendelkezésre álló beavatkozási időablakot. Ez a 3.2.6. alfejezetben megfogalmazott időszerűségi feltétel szabályozástechnikai megfelelője. A 9.2. alfejezet gördülő időhorizonton megfogalmazott optimalizálási modellje a kör döntési részét formalizálja: a gyártási program módosítását, státuszváltozást vagy végrehajtási eseményt követően a bemenő adatok frissíthetők és az aktuálisan nyitott feladatokra új optimalizálási feladat oldható meg [S1]. Ez az újraütemezés szakirodalmában megkülönböztetett eseményvezérelt megoldásnak felel meg, szemben a rögzített időközönként végzett, periodikus újratervezéssel [P65].

A kapcsolat automatizáltságát külön kell értékelni a két irányban. A fizikai és a digitális objektum közötti adatkapcsolat szerinti osztályozásban az egyirányú automatikus adatáramlás a digitális árnyék, a kétirányú automatikus adatkapcsolat pedig a digitális iker kategóriájával hozható kapcsolatba [P66]. A modell a felfelé irányuló kapcsolatban a működési feladat reakcióidejéhez igazodó, eseményalapú adatgyűjtést feltételez, az utólagos kézi adatbevitel önmagában nem feltétlenül biztosítja az ehhez szükséges időszerűséget. A lefelé irányuló kapcsolat automatizáltságát nyitva hagyja: a döntéstámogatás funkció emberi jóváhagyást is megenged. A belső kör mellett a külső információáramok két további kört alkotnak. A beszállítói oldalon a megrendelésre és az ütemezésre a szállítási státusz és a várható érkezési idő a válasz, a vevői oldalon a visszaigazolásra és a státuszra az esetleges módosítás. E külső körök ciklusideje a partnerek reakcióidejétől függ és nem áll a rendszer irányítása alatt, a belső kör feladata ezért az is, hogy a külső változásokat a rendelkezésre álló időn belül kezelje.

9.1.7.2. Az anyagáram és az információáram szinkronja

A végrehajtáshoz szükséges információnak az anyagmozgás megkezdése előtt rendelkezésre kell állnia, a végrehajtást pedig vissza kell igazolni. Minden folyamatszakaszban három elem kapcsolódik össze:

- az előzetes információ, amely a tevékenységet kiváltja
- maga az anyagmozgás
- és a visszaigazoló információ, amely az 1. réteg állapotképét frissíti.

A beérkeztetésnél az előzetes információ a szállítási értesítés és a várható érkezési idő, a visszaigazolás a betárolással létrejövő készletadat. A gyártás-előkészítésnél a gyártási programból képzett komissiózási feladat előzi meg a kiszedést és a címkével azonosított egység előkészített státusza követi. A gyártáskiszolgálásnál a milk-run hozzárendelés a kiváltó, a gyártósor melletti leadás jelzése a záró információ. A végső konfigurálásnál a rendelés konfigurációs adatai állnak a gyártósor rendelkezésére, a készrejelentés pedig a vevőnek küldött gyártási státusz alapja. A késztermékkezelésnél a kiszállítási határidő a kiváltó elem, a szállítási értesítés és a nyomonkövetési információ a záró.

A szinkron egyik időbeli jellemzője az információ rendelkezésre állása és a kapcsolódó anyagmozgás közötti időeltérés. A 9.2. alfejezet ezt két paraméterrel fejezi ki: a logisztikai feladat kiadási időpontja a rendelés tervezett kezdését a feladatképzési előidővel, legkésőbbi teljesítési időpontja a biztonsági időtartalékkal előzi meg. Ha a szükséges információ késve érkezik, az anyagmozgatás várakozhat, illetve hibás célhelyre történő szállítás vagy ismételt anyagmozgatás válhat szükségessé. A késedelmes visszaigazolás miatt az 1. réteg elavult állapotadatokra támaszkodhat, ami a következő döntési ciklusban is hibát okozhat. A szinkront az azonosítási műveletek teszik lehetővé, mert ezek kötik a fizikai tárgyat az adathoz. Ez magyarázza, hogy az azonosítás az első, a címkézés a második és a negyedik szakaszban is szerepel: az anyag nyilvántartási állapota és azonosítási kapcsolata mindhárom ponton változik, előbb beszállítói tételből készletté, majd készletből rendeléshez rendelt egységgé, végül alkatrészekből késztermékké válik és az állapotváltozásokat a nyilvántartásban követni kell. A termelés és a logisztika valós idejű szinkronizálása a dolgok internetére épülő megoldások egyik vizsgált alkalmazási területe [P16].

9.1.7.3. A késleltetés és a differenciálási pont helye

A halasztás a modellben három, egymástól időben és helyben elváló ponthoz köthető. A változatdöntés időpontja az a pillanat, amikor a vevői megrendelés a gyártási programba kerül és ezzel az 1. rétegben eldől, hogy a közös termékalapból mely változat készül. A lekötési pont a második szakaszban van, ahol a változatspecifikus anyagok kiszedésével a döntés fizikai következménnyel jár, de még visszafordítható. A differenciálási pont a negyedik szakasz kezdete, ahol a termék végleges változatspecifikus kialakítást kap. A késleltetés tartalma az, hogy a közös termékalap a beérkeztetéstől a differenciálási pontig fizikailag változatsemleges maradhat: az első szakaszban semmilyen rendeléshez nem kötődik, a másodikban és a harmadikban a közös termékalap fizikailag továbbra is több változathoz felhasználható. Az első szakasz készletének utánpótlása elsősorban a várható szükségletre épülő beszerzési megrendelésekkel történik, a második szakasztól kezdve viszont minden tevékenység tényleges vevői megrendelés alapján folyik. A két vezérlési elv határa így az első és a második szakasz között húzódik, ami a vevői rendelési szétkapcsolási pont (customer order decoupling point) fogalmának felel meg [P67, P68]. A halasztás e pont helyét is érinti [P69].
A digitális réteg csökkentheti a döntés előkészítésének időigényét, így a változatdöntés későbbre halasztható a vállalt határidő megtartásával. A legkésőbbi döntési időpontot a vállalt határidőből a hátralévő műveletek átfutási idejének, az információs késedelemnek és a szükséges biztonsági tartaléknak a levonásával lehet meghatározni. Az 1. réteg ennek három összetevőjére hat. A valós idejű adatgyűjtés és az adatintegráció az információs késedelmet csökkenti, mert a megrendelés és a készlet állapota kötegelt frissítés nélkül áll rendelkezésre. Az optimalizálás és az operatív ütemezés a feladatképzés idejét rövidíti és a meglévő erőforrások mellett megkeresi a határidőt még tartó végrehajtási sorrendet. A monitoring és az operatív teljesítményértékelés javíthatja az eltérések korai felismerését, így megfelelő működési feltételek mellett a szükséges biztonsági tartalék csökkentését is támogathatja. A digitális réteg önmagában nem szünteti meg a fizikai műveletek időigényét, ezért a halaszthatóságnak alsó határa van, amelyet a 2. réteg erőforrásai szabnak meg.
Az összefüggés döntéselméleti alapja, hogy a később megszerzett információ csak akkor értékes, ha a döntés még módosítható [P10]. A három pont közötti különbségtétel a módosíthatóság feltételeinek változását teszi értelmezhetővé. A változatdöntés és a lekötési pont között a rendelésmódosítás az anyagáramban rendszerint még nem igényel többletműveletet. A lekötési és a differenciálási pont között a módosítás ismételt anyagmozgatást és újra-előkészítést tehet szükségessé. A differenciálás megkezdése után az addig elvégzett műveletektől függően átszerelésre, újracsomagolásra, újracímkézésre vagy a már kialakított termékváltozat készletre vételére is szükség lehet. A modell lehetséges működési mechanizmust ír le, és nem állít empirikusan igazolt hatásnagyságot. A 7. fejezet eredményei szerint a vizsgált mintában a halasztási stratégia alkalmazása és az egyes digitális eszközök megléte között nem volt kimutatható szignifikáns kapcsolat. A modell tehát arra ad magyarázatot, hogy a digitális képességek milyen úton támogathatják a halasztást, arra nem, hogy ez a vállalatoknál ténylegesen milyen mértékben következik be.

9.1.7.4. A digitális funkciók és a folyamatszakaszok kapcsolata

A hét digitális funkció nem azonos módon kapcsolódik az öt folyamatszakaszhoz, a megfeleltetést a 20. táblázat mutatja be, amelynek cellái a funkció jellemző tartalmát adják meg az adott szakaszban. Az első három funkció, a valós idejű adatgyűjtés, az adatintegráció és a

monitoring minden szakaszban megjelenik, mivel az átfogó állapotkép kialakításához minden folyamatszakaszról szükségesek adatok. Az operatív teljesítményértékelés szintén minden szakaszra kiterjed, de szakaszonként más mutatóval, amelyekre a 20. táblázat negyedik sora ad példát.

Digitális funkció	1. Beérkeztetés és tárolás	2. Gyártás előkészítés	3. Gyártás kiszolgálás	4. Végső konfigurálás	5. Késztermék kezelés
Valós idejű adatgyűjtés	átvétel, azonosítás	kiszedés, címkézés	leadás a gyártósornál	indítás, készre jelentés	expediálás, kiszállítás
Adatintegráció	szállítási értesítés és átvétel egyeztetése	gyártási program és készlet összerendelése	feladat és soroldali készlet összerendelése	rendelés és változatadatok összerendelése	rendelés és szállítási egység összerendelése
Monitoring	várt és beérkezett szállítmányok	feladatok állapota	körök és soroldali készlet állapota	rendelések előre-haladása	kiszállításra váró egységek
Operatív teljesítmény-értékelés	átvételi és betárolási idő	határidőre előkészített egységek aránya	határidőre teljesített feladatok aránya, reakcióidő	a gyártási program teljesülése	a kiszállítás pontossága
Optimalizálás	tárolóhely kijelölése	készlet lefoglalása	feladatok milk-run körhöz rendelése	rendelések gyártósorhoz rendelése	szállítási egységek képzése
Operatív ütemezés	átvételek sorrendje	feladatkiadás időpontja és sorrendje	körök indítása, feladatok sorrendje	adottság: gyártási program	kiszállítások időzítése
Döntés-támogatás	eltérő szállítmány kezelése	prioritás anyaghiány esetén	sürgős feladat beillesztése	rendelések közötti prioritás	prioritás határidő ütközéskor

20. táblázat: A digitális funkciók kapcsolódása a folyamatszakaszokhoz

Az optimalizálás, az operatív ütemezés és a döntéstámogatás tartalma folyamatszakaszonként eltér. Az optimalizálás a gyártáskiszolgálásban a szállítási feladatok erőforrásokhoz rendelését, a végső konfigurálásban a rendelések gyártósorhoz rendelését támogathatja. Az operatív ütemezés az előkészítési és szállítási feladatok időzítésére, valamint az átvételek és kiszállítások sorrendjére terjed ki. A döntéstámogatás a megengedett alternatívák következményeinek értékelésében és az ütköző prioritások kezelésében kap szerepet. A 20. táblázat e funkciók jellemző alkalmazási területeit szemlélteti, a támogatás intenzitását vagy hatásának nagyságát nem számszerűsíti. A modell a differenciálást megelőző anyagellátás és a végső konfigurálás összehangolását emeli ki, mivel a késői változatdöntést követően az előkészítési, szállítási és konfigurálási feladatokat a fennmaradó teljesítési időn belül kell végrehajtani. Ehhez kapcsolódik a 9.2. alfejezet matematikai modellje, amely a rendelések gyártósorhoz rendelését, valamint a milk-run alapú gyártáskiszolgálás optimalizálását és ütemezését formalizálja. A második szakaszt a feladatképzési előidőn keresztül veszi figyelembe, az első és az ötödik szakaszra pedig nem terjed ki.

9.1.7.5. A korlátok hatása az optimalizálásra és az ütemezésre

Az erőforrások és működési korlátok az optimalizálás és az operatív ütemezés megengedett megoldásainak halmazát jelölik ki, ezért e két funkció eredménye nem értelmezhető a korlátok nélkül. A kapacitáskorlátok a teljesíthető rendelési volument határolják: a 9.2. alfejezet első célfüggvénye az adott erőforrásszint mellett elérhető legnagyobb volument keresi, a volumenflexibilitási mutató (LF4) pedig azt fejezi ki, hogyan változik ez az érték az erőforrásszinttel. A modell alsó sávjában bemutatott erőforrások és korlátok közül a 9.2.

alfejezet egyeseket paraméterként, másokat korlátozó feltételként vesz figyelembe. A technológiai korlátok az alternatív hozzárendelések számát csökkentik, amit a mixflexibilitási mutató (LF3) jellemez, amely az egy terméktípus előállítására alkalmas gyártósorok átlagos számán alapul. A normatív korlátok közül a szolgáltatási szintre vonatkozó előírás az első optimalizálási lépésben feltételként jelenik meg, így a volumen nem növelhető a határidők tömeges megsértése árán.

Az időablakok a mennyiségi korlátok mellett az ütemezés megvalósíthatóságát is meghatározzák. Egy időszak összesített kapacitása elegendő lehet, miközben a feladatok rövid időszakra torlódnak. A 3.2.1. alfejezetben ismertetett sorbanállás-elméleti eredmény szerint a várakozás meredeken nő, amikor a kihasználtság a kapacitáshatárhoz közelít [P8]. Halasztott differenciálás mellett ez a hatás erősödhet, mert a késői döntés a feladatokat a határidő előtti szűk időszakba tereli. Az időablakok megsértése így akkor is előfordulhat, ha az összesített kapacitás elegendő. A rendszer rugalmasságának értékelésekor ezért a volumen mellett a reakcióidőt és a határidőre teljesített feladatok arányát is figyelembe kell venni. A korlátok egymással is kölcsönhatásban állnak: a szűk technológiai alkalmasság egyes gyártósorokra tereli a rendeléseket, ez ott sűríti az anyagellátási feladatokat, ami a milk-run körök kapacitását és a soroldali tárolókapacitást terheli.

A korlátok és az információ viszonya a modell egészének értelmezéséhez is hozzájárul. Az információfeldolgozási megközelítés szerint a bizonytalanság a tartalékok növelésével vagy az információfeldolgozó képesség bővítésével kezelhető [P9]. A modellben az előbbit az alsó sáv lazább korlátai, az utóbbit az 1. réteg képviseli. Bőséges erőforrások mellett a döntések összehangolásából származó többletelőny kisebb lehet, mert több végrehajtási sorrend is megengedett. Szoros korlátok mellett viszont a megengedett megoldások köre szűkül, és az alkalmas megoldások megtalálása összehangolt döntéstámogatást igényelhet. A digitális réteg döntéstámogató értéke szorosabb korlátok mellett növekedhet, hatása azonban nem korlátlan: ha az aktuális korlátok mellett nincs megengedett megoldás, az információ önmagában nem pótolja a hiányzó fizikai kapacitást. Ez összhangban áll azzal az eredménnyel, amely szerint a fizikai folyamat jellemzőinek javítása nagyobb előnnyel járhat, mint az információ megosztása önmagában [P7] és megmagyarázza, miért szükséges a rugalmasság értékelésekor az erőforrásszintet és az irányítás minőségét együtt vizsgálni.

9.1.8. A modell feltételezései, érvényességi köre és korlátai

A modell a következő feltételezésekre épül. A termékszerkezet lehetővé teszi a közös termékalap és a változatspecifikus elemek szétválasztását, a végső konfigurálás pedig a vevő által elfogadott határidőn belül elvégezhető (3.2.5. alfejezet). A kezelt információk a három informatikai rendszerben azonos jelentéssel és a döntéshez szükséges frissességgel állnak rendelkezésre, vagyis teljesülnek a 3.2.6. alfejezetben tárgyalt adatminőségi és interoperabilitási feltételek [P35, P36]. A modell feltételezi az 1. réteg jóváhagyott utasításainak végrehajtását a 2. rétegben, ami egyértelmű döntési jogköröket, valamint a termelés és a logisztika összehangolt prioritásait igényli [P33]. A gyártási programból átvett tervezett kezdési időpontok az operatív ütemezés bemenő adatai. Az operatív döntések ezek figyelembevételével határozzák meg a rendelések technológiailag alkalmas gyártósorokhoz rendelését és a kapcsolódó logisztikai feladatok végrehajtását. A gyártási program adottságként kezelése ebben az értelemben az átvett tervadatok rögzítettségét jelenti. Az erőforrások és a korlátok egy döntési időablakon belül ismertek. Végül a közös termékalap és a változatspecifikus anyagok utánpótlását megalapozó előrejelzés és középtávú tervezés a rendszerhatáron kívül történik, a

modellbe ennek eredménye a beszerzési megrendeléseken és a gyártási programon keresztül lép be.
A modell érvényességi köre ennek megfelelően a darabárut előállító, több termékváltozatot kezelő, a differenciálást végső összeszereléssel és csomagolással megvalósító, egyetlen telephelyre kiterjedő rendszerek operatív működése. A 3.2.2. alfejezet megkülönböztetését követve a modell telephelyi szintű, az ellátási lánc szervezetközi kapcsolatait csak a négy külső információáram erejéig tartalmazza. Nem terjed ki a halasztás más típusainak önálló modellezésére, a stratégiai és beruházási döntésekre, a visszutas anyagáramra, a pénzügyi folyamatokra, valamint a megvalósítás költségeire és gazdaságosságára. A rendszerek összekapcsolásából eredő informatikai biztonsági kérdéseket [P39] szintén nem tárgyalja.
A modell hat korlátját szükséges kiemelni:

1. Koncepcionális modellről van szó, amelynek empirikus érvényességét ez az alfejezet nem igazolja. A koncepcionális modell validálása a modellezés külön lépése [P70], amelyhez a 9.2. alfejezet formális modellje és az arra épülő vizsgálatok részleges alapot adhatnak.
2. A kérdőíves felmérés a modell mechanizmusait sem megerősíteni, sem cáfolni nem alkalmas, mert vállalati szintű önértékelést mért, nem folyamatadatokat (3.2.4. alfejezet).
3. A digitális funkciók ábrázolása egyszerűsítés: a 33. ábra a funkciók logikai egymásra épülését mutatja, de nem részletezi párhuzamos vagy ismétlődő működésüket és belső visszacsatolásaikat. Az egyes funkciók folyamatszakaszokhoz való kapcsolódását a 20. táblázat szemlélteti. Az irányítási kör ciklusidejét a modell nem számszerűsíti.
4. A modell ismertnek és az adott döntési időablakon belül rögzítettnek tekinti a korlátokat. A feldolgozási idők és az erőforrások rendelkezésre állása a gyakorlatban bizonytalan lehet, ennek kezelésére a robusztus optimalizálás is alkalmazható [P71], amelynek alkalmazása túlmutat az értekezés keretein.
5. A modell nem határozza meg a digitális funkciók konkrét alkalmazások közötti felosztását, sem az interfészek műszaki megvalósítását. Ezeket a konkrét rendszer kialakításakor, a meglévő informatikai környezet és a működési követelmények alapján kell meghatározni.
6. A funkciók informatikai rendszerek közötti megosztása a modellben az IEC 62264 szerinti szokásos munkamegosztást követi, egy adott vállalatnál azonban ettől eltérhet, és a funkciók egy része egyedi fejlesztésű rendszerben is megvalósulhat. A modell ezért funkcionális szinten általánosítható, a bemutatott rendszerkategóriák közötti munkamegosztás egy lehetséges megvalósítást szemléltet.

9.1.9. Összegzés és tézis

Az alfejezet a digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modelljét mutatta be. A modell a rendszert két rétegre és a hozzájuk kapcsolódó környezetre bontja. A digitális információs és döntéstámogató réteg integrált informatikai támogatásra, öt kezelt információtípusra és hét digitális funkcióra épül. A fizikai végrehajtási réteg öt folyamatszakaszból, valamint az ezekre ható erőforrásokból és működési korlátokból áll. A két réteg visszacsatolt irányítási kört alkot: a működési adatok a döntések előkészítését szolgálják, a kiadott utasítások módosítják a fizikai végrehajtást, amelynek eredménye új adatként kerül vissza a digitális rétegbe. A halasztás értelmezéséhez a modell megkülönbözteti a változatdöntés időpontját, az anyagok rendeléshez kötésének pontját és a fizikai differenciálás

megkezdését. A digitális támogatás az információs késedelem mérséklésével és a végrehajtási feladatok összehangolásával lehetővé teheti a változatdöntés későbbre halasztását a vállalt határidő megtartása mellett. A modell e mechanizmust a differenciálást megelőző anyagellátás és a végső konfigurálás kapcsolatában részletezi. A rendszer teljesíthetőségét az erőforrások és a működési korlátok együttesen határozzák meg, az információ döntéstámogató értékét pedig a működési korlátok és a rendelkezésre álló beavatkozási lehetőségek együttesen befolyásolják. A modell egyúttal kijelöli a következő alfejezet tárgyát. A 9.2. alfejezet a működési modell egyik, operatív döntésekkel leírható részét formalizálja: a rendelések gyártósorhoz rendelését, a logisztikai feladatok időzítését és a milk-run alapú gyártáskiszolgálást, a kapacitás-, az idő- és a technológiai korlátok figyelembevételével. A beérkeztetés, a késztermékkezelés, a külső információáramok, valamint az adatgyűjtés és az adatintegráció funkciói a matematikai modellnek nem részei, azok bemenő adatain keresztül jelennek meg. A flexibilitási mutatók azt számszerűsítik, hogy a 2. réteg hogyan válaszol a volumen, a termékmix és az erőforrásszint változására, vagyis az itt leírt szerkezet működését teszik mérhetővé.
A fejezetben bemutatott általános működési modell és az annak kidolgozása során feltárt összefüggések alapján a következő tudományos tézist fogalmazom meg:

IV. TÉZIS - A digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modellje
Kidolgoztam a digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modelljét, amely egységes rendszerben írja le a postponement stratégia megvalósításához szükséges anyag-, információ- és döntési folyamatokat, valamint a digitális megoldások ezekben betöltött szerepét. Meghatároztam a rendszer digitális információs és döntéstámogató, valamint fizikai végrehajtási rétegét, azok kapcsolatait, továbbá a postponement megvalósítását befolyásoló erőforrásokat és működési korlátokat. [S1]

9.2. A postponement logisztikai rendszer operatív optimalizálásának matematikai modellje és flexibilitási mutatói

Az előző alfejezetben bemutatott digitálisan támogatott postponement logisztikai rendszer gyártáshoz kapcsolódó operatív belső logisztikai részfolyamatainak matematikai leírására egy vegyes egészértékű lineáris programozási (MILP) modellt dolgoztam ki. A modell célja a rendszer kiválasztott operatív döntéseinek egységes matematikai formalizálása, valamint a termeléshez kapcsolódó belső logisztikai folyamatok operatív optimalizálása a rendelkezésre álló erőforrások, technológiai korlátok és időbeli követelmények figyelembevételével.

9.2.1. A vizsgált postponement logisztikai rendszer általános matematikai modellje

A matematikai modell a digitálisan támogatott postponement logisztikai rendszer működésének azokat az operatív döntéseit formalizálja, amelyek a belső anyagáramlás, az anyagellátás és a gyártáskiszolgálás teljesítményére hatnak. Ennek megfelelően a modell integrált módon kezeli a gyártási rendelések gyártó- és csomagolósorokhoz történő hozzárendelését, a gyártási tervből származó belső logisztikai feladatok időzítését, a milk-run alapú belső anyagellátást, valamint az ezekhez kapcsolódó erőforrás- és kapacitáskorlátokat. A gyártási rendelések tervezett kezdési időpontjai a modell bemenő paraméterei, míg a matematikai modell ezek figyelembevételével optimalizálja a rendelések sorhozzárendelését és az azokból származó belső logisztikai feladatok végrehajtását. A gyártási erőforrások és az anyagmozgató eszközök ütemezése egymással kölcsönhatásban áll, ezért a két döntés összehangolt kezelése kedvezőbb megoldáshoz vezethet, mint külön-külön történő optimalizálásuk [P72]. A belső alkatrész-

logisztika, ezen belül a milk-run alapú anyagellátás tervezési döntéseiről és szakirodalmáról átfogó áttekintés áll rendelkezésre [P73].
A probléma két, egymással összekapcsolt döntési szintre bontható:

1. A gyártási rendelések gyártó- vagy csomagolósorokhoz rendelése a tervezett kezdési időpontok figyelembevételével.
2. Az ezekből származó anyagellátási és visszaszállítási feladatok milk-run körökhöz rendelése és sorrendezése.

A két döntési szint gördülő időhorizonton működtethető [P74]. Minden új gyártási terv, státuszváltozás vagy végrehajtási esemény után a bemenő adatok frissíthetők, majd az aktuálisan nyitott feladatokra új optimalizálási feladat oldható meg. A konkrét alkalmazástól függően a bemenő adatokat külső termeléstervezési vagy ütemezési rendszer szolgáltathatja. Ez a megközelítés lehetőséget ad az időközben bekövetkező változások kezelésére, szemben az egyszeri, műszak eleji optimalizálással. Az előzetesen elkészített terv és az eseményvezérelt újratervezés ilyen kombinációja a dinamikus ütemezés szakirodalmában prediktív-reaktív megközelítésként ismert [P75]. A továbbiakban a gyártó- és csomagolósorokat egységesen gyártósorként jelölöm, mivel a matematikai modell szempontjából azonos funkciót töltenek be. A modell felépítése során a halmazok, paraméterek, döntési változók, célfüggvény és korlátozó feltételek együttesen adják a vizsgált operatív döntési feladat matematikai leírását. A következőkben a halmazokat, paramétereket, döntési változókat, célfüggvényeket és korlátozó feltételeket ismertetem.

Halmazok

Jelölés	Értelmezés
R	gyártási (csomagolási) rendelések halmaza
L	gyártósorok halmaza
T	diszkrét tervezési időintervallumok halmaza, ahol $t \in T$ az adott időintervallum kezdő időpontját jelöli
F	a vizsgált döntési horizonton nyitott és végrehajtható anyagkiszállítási és visszaszállítási logisztikai feladatok halmaza
F^+	kiszállítási logisztikai feladatok halmaza
$F_{\text{krit}} \subseteq F^+$	A gyártási rendelések megkezdéséhez nélkülözhetetlen anyagok kiszállítási feladatainak halmaza.
F^-	visszaszállítási logisztikai feladatok halmaza
F_0	$F_0 = F \cup \{0\}$, a logisztikai feladatok halmaza a 0-val jelölt kiindulási és visszatérési ponttal kiegészítve
K	az adott operatív döntési időablakban indítható milk-run körök halmaza

Fő bemenő paraméterek

Jelölés	Értelmezés
q_r	az r-edik rendelés mennyisége
A_{rl}	1, ha az r-edik rendelés az l-edik gyártósoron feldolgozható, egyébként 0
p_{rl}	az r-edik rendelés feldolgozási ideje az l-edik gyártósoron

Jelölés	Értelmezés
d_r	az r-edik rendelés teljesítési határideje
w_f	az f-edik logisztikai feladat prioritási súlya
c_{fg}	az f-edik és g-edik logisztikai feladat egymás utáni végrehajtásához szükséges idő, $$c_{fg} > 0, \qquad \forall f, g \in F \ , f \neq g$$
c_{0f}	a 0-val jelölt kiindulási ponttól az f-edik logisztikai feladat teljesítéséig szükséges idő, $c_{0f} > 0, \forall f \in F$.
d_{fg}	az f-edik és g-edik logisztikai feladat kiszolgálási helye közötti távolság, ahol $f, g \in F_0, \text{és } F_0 = F \cup \{0\}$
C_l	az l-edik gyártósor mellett rendelkezésre álló soroldali tárolókapacitás
H	az adott operatív döntési időablakban egyidejűleg rendelkezésre álló, egy-egy milk-run kör végrehajtására igénybe vehető anyagkiszállító erőforrások maximális száma
M	kellően nagy pozitív konstans a logikai feltételek linearizálásához
ε_z	a késedelem megkülönböztetésére alkalmazott kis pozitív időérték, $\varepsilon_z > 0$.
$\eta_{\min}$	a határidőre teljesített logisztikai feladatok minimálisan elvárt aránya
$E_{\max}$	a logisztikai feladatok megengedett maximális átlagos reakcióideje
θ_f	az f-edik logisztikai feladathoz tartozó feladatképzési előidő
δ_f	az f-edik logisztikai feladathoz tartozó biztonsági időtartalék
t_r^0	az r-edik rendelés tervezett kezdési időpontja
N^+	egy milk-run körben végrehajtható kiszállítási logisztikai feladatok maximális száma
N^-	egy milk-run körben végrehajtható visszaszállítási logisztikai feladatok maximális száma
D_{lt}	az l-edik gyártósorra a t-edik időintervallumban kiszállított anyagmennyiség.
U_{lt}	az l-edik gyártósoron a t-edik időintervallumban felhasznált anyagmennyiség
B_{l0}	az l-edik gyártósor kezdeti soroldali készletszintje

Származtatott időparaméterek

e_f	az f-edik logisztikai feladat kiadási időpontja
b_f	az f-edik logisztikai feladat legkésőbbi teljesítési időpontja

A logisztikai feladatok időparaméterei a kapcsolódó rendelések tervezett kezdési időpontjai alapján az alábbi összefüggésekkel számíthatók:

$$\begin{aligned} e_f &= t^0_{r(f)} - \theta_f, \\ b_f &= t^0_{r(f)} - \delta_f, \end{aligned} \tag{10}$$

ahol $r(f)$ az f-edik logisztikai feladathoz tartozó rendelést jelöli.

Az f-edik logisztikai feladathoz tartozó gyártósort az $l(f)$ leképezés jelöli. Ennek megfelelően a logisztikai feladatok kiszolgálási helye a kapcsolódó rendelés potenciális gyártósorához kötött, így a feladatok közötti d_{fg} távolság és c_{fg} végrehajtási idő előre meghatározható.
Fontos feltétel, hogy

$$\theta_f \geq \delta_f \geq 0, \tag{11}$$

mert ebből következik, hogy

$$e_f \leq b_f \leq t^0_{r(f)}. \tag{12}$$

Ez az időbeli összefüggés biztosítja, hogy a feladat kiadási időpontja legkésőbb a megengedett teljesítési időponttal egybeessen.

Döntési változók

Jelölés	Értelmezés
y_{rlt}	1, ha az r-edik rendelés az l-edik gyártósorhoz van rendelve, és végrehajtása a tervezett kezdési időpontnak megfelelő t-edik időintervallumban kezdődik, egyébként 0
v_r	1, ha az r-edik rendelés a vizsgált gördülő időhorizonton végrehajtásra kiválasztásra kerül, egyébként 0.
h_f	1, ha az f-edik logisztikai feladat a kapcsolódó rendelés tényleges gyártósor-hozzárendelése alapján aktiválódik, egyébként 0.
g_{fk}	1, ha az f-edik logisztikai feladatot a k-adik milk-run kör hajtja végre, egyébként 0
x_{fgk}	1, ha a k-adik milk-run körben f-edik logisztikai feladathoz tartozó kiszolgálási helyet közvetlenül a g-edik logisztikai feladathoz tartozó kiszolgálási hely követi, egyébként 0, ahol $f, g \in F_0, f \neq g$, és a 0 index a kiindulási és visszatérési pontot jelöli.
a_k	1, ha a k-adik milk-run kör elindításra kerül, egyébként 0
τ_f	az f-edik logisztikai feladat modell által meghatározott teljesítési időpontja (nemnegatív folytonos változó)
E_f	az f-edik logisztikai feladat kiadása és teljesítése között eltelt reakcióidő (nemnegatív folytonos változó)
L_f	az f-edik logisztikai feladat késése (nemnegatív folytonos változó)
z_f	késedelmet jelző bináris változó, aktív feladat esetén értéke 1, ha az f-edik logisztikai feladat a legkésőbbi teljesítési időpont után teljesül.
$U_{\max}$	a gyártósorok közül a legnagyobb kapacitáskihasználási arány
B_{lt}	az l-edik gyártósor mellett a t-edik időintervallum végén rendelkezésre álló készletszint

A döntési változók értelmezési tartománya:

$$\begin{gathered} y_{rlt}, v_r, h_f, g_{fk}, x_{fgk}, a_k, z_f \in \{0,1\}, \\ \tau_f, E_f, L_f, B_{lt} \geq 0 \end{gathered} \tag{13}$$

9.2.1.1. Célfüggvények

A modell célrendszere kétlépcsős, ε-korlátos optimalizálási megközelítésre épül [P76, P77]. Az első lépés az adott termelési és logisztikai erőforrások, valamint az előírt szolgáltatási szint mellett teljesíthető rendelési volument maximalizálja. A második lépés a meghatározott optimális volumenhez megengedett eltérésen belül optimalizálja az operatív logisztikai teljesítményt. Ez a megközelítés azt szolgálja, hogy a késések, a reakcióidő, a szállítási távolság és az erőforrás-felhasználás csökkentése ne a teljesíthető volumen indokolatlan csökkenésével valósuljon meg [S1]. A célok fontossági sorrendjén alapuló, egymást követő optimalizálási lépések a lexikografikus módszer alapgondolatát követik, amelyben a magasabb prioritású cél elért értéke a további lépésekben korlátként jelenik meg [P78].

Első célfüggvény: a teljesíthető volumen maximalizálása

$$Q(H) = \sum_{r \in R} q_r \, v_r \rightarrow max. \tag{14}$$

Az első célfüggvény a teljesíthető rendelési volumen maximalizálását célozza az adott gyártósori, soroldali tárolási, milk-run és anyagkiszállítási erőforráskorlátok, valamint az előírt szolgáltatási szint figyelembevételével.

Legyen az első optimalizálási lépés eredménye: Q_{max} (H). Az első lépés eredménye az adott erőforrásszint mellett teljesíthető maximális rendelési volument adja meg Q_{max}(H), és egyben a volumenflexibilitási mutató meghatározásának alapját képezi.

Második célfüggvény: az operatív logisztikai teljesítmény optimalizálása

A második lépésben:

$$\sum_{r \in R} q_r \, v_r \geq (1 - \varepsilon) Q_{\max}(H), \tag{15}$$

ahol

$$0 \leq \varepsilon < 1 \tag{16}$$

feltétel mellett minimalizálható az operatív célfüggvény:

$$\boldsymbol{F_{op}} = \quad \boldsymbol{\alpha_1} \frac{\sum_{f \in F} \boldsymbol{w_f L_f}}{\boldsymbol{L_{\mathrm{ref}}}} + \boldsymbol{\alpha_2} \frac{\sum_{f \in F} \boldsymbol{E_f}}{\boldsymbol{E_{\mathrm{ref}}}} + \boldsymbol{\alpha_3} \frac{\sum_{k \in K} \sum_{f \in F_0} \sum_{\substack{g \in F_0 \\ g \neq f}} \boldsymbol{d_{fg} x_{fgk}}}{\boldsymbol{D_{\mathrm{ref}}}} + \tag{17}$$

$$+ \boldsymbol{\alpha_4} \frac{\sum_{k \in K} \boldsymbol{a_k}}{\mid \boldsymbol{K} \mid} + \boldsymbol{\alpha_5 U_{\max}} \rightarrow \boldsymbol{min}.$$

Az operatív célfüggvény (F_{op}) első tagja a prioritással súlyozott késések összegét, második tagja a logisztikai feladatok reakcióidejét, harmadik tagja a milk-run körök teljes útvonalhosszát, negyedik tagja az elindított milk-run körök számát, ötödik tagja pedig a gyártósorok maximális kapacitáskihasználását minimalizálja.

Az $\alpha_1, \ldots, \alpha_5$ súlyok a célkomponensek relatív jelentőségét fejezik ki, amelyekre

$$\sum_{m=1}^{5} \alpha_m = 1, \;\; \alpha_1 > 0, \;\; \alpha_m \geq 0, \;\; ahol \;\; m = 2, \ldots, 5 \tag{18}$$

feltételek érvényesek. A súlyok vezetői preferenciák, szakértői becslések vagy érzékenységvizsgálat alapján választhatók meg. A szakértői súlyok meghatározásának egyik

elterjedt, strukturált eszköze az analitikus hierarchia eljárás (Analytic Hierarchy Process, AHP) [P79]. A célkomponensek normalizálására azért van szükség, mert eltérő mértékegységű és nagyságrendű tagok súlyozott összegében a súlyok önmagukban nem tükrözik a célok relatív fontosságát [P80].

A célfüggvényben szereplő jelölések:

Jelölés Értelmezés

- ε az első lépésben meghatározott maximális volumenhez képest megengedett relatív eltérés
- L_{ref} a késés normalizálására szolgáló pozitív referenciaérték, $L_{\mathrm{ref}} > 0$
- E_{ref} a reakcióidő normalizálására szolgáló pozitív referenciaérték, $E_{\mathrm{ref}} > 0$
- D_{ref} a teljes útvonalhossz normalizálására szolgáló pozitív referenciaérték, $D_{\mathrm{ref}} > 0$
- α_m az m-edik operatív célkomponens súlya, $m = 1, \dots, 5$

Az anyagellátás határidőre történő teljesítése elsődleges működési követelmény. Ezt egyrészt az első optimalizálási lépésben alkalmazott szolgáltatásiszint-korlátok, másrészt az operatív célfüggvény prioritással súlyozott késési komponense biztosítja.

9.2.1.2. A modell korlátozásai

a) Rendelések gyártósorokhoz rendelése

Minden, a vizsgált gördülő időhorizonton teljesítésre kiválasztott rendelést pontosan egy technológiailag alkalmas gyártósorhoz kell rendelni. A feldolgozás a bemenő paraméterként rögzített tervezett kezdési időpontban indul. A rendelések kiválasztásának és ütemezésének együttes kezelése a rendeléselfogadási és ütemezési (order acceptance and scheduling) feladatok körébe tartozik [P81], a gyártósorok technológiai alkalmasságának korlátozása pedig a párhuzamos gépes ütemezésben ismert feldolgozásihalmaz-korlátozásnak (processing set restrictions) felel meg [P82].

$$\forall r \in R\colon \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} y_{rlt} = v_r. \tag{19}$$

A tervezett kezdési időpont bemenő paraméter, ezért a rendelés más időintervallumban nem indítható:

$$\forall r \in R,\, l \in L,\, t \in T\colon y_{rlt} = 0, t \neq t_r^0. \tag{20}$$

A rendelés kizárólag technológiailag alkalmas sorhoz rendelhető:

$$\forall r \in R, l \in L,\, t \in T\colon y_{rlt} \leq A_{rl}, \tag{21}$$

$$\forall f \in F\colon h_f = \sum_{t \in T} y_{r(f),l(f),t}. \tag{22}$$

A fenti összefüggés biztosítja, hogy az f-edik logisztikai feladat akkor és csak akkor aktiválódjon, ha a hozzá kapcsolódó $r(f)$ rendelés az $l(f)$ gyártósorhoz kerül hozzárendelésre.

b) Gyártósori kapacitás

Egy gyártósor egy időintervallumban legfeljebb egy aktív rendelést kezelhet, ami az időindexelt ütemezési formulációk szokásos kapacitásfeltétele [P83]:

$$\forall l \in L,\, t \in T\colon \sum_{r \in R} \sum_{\substack{\tau \in T\colon \\ \tau \leq t < \tau + p_{rl}}} y_{rl\tau} \leq 1. \tag{23}$$

A teljesítésre kiválasztott rendelés tervezett befejezési időpontja nem haladhatja meg a teljesítési határidőt:

$$\forall r \in R: \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (t + p_{rl}) y_{rlt} \leq d_r + M(1 - v_r). \tag{24}$$

A gyártósorok kapacitáskihasználása:

$$\forall l \in L: \frac{\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} p_{rl}\, y_{rlt}}{| T |} \leq U_{\max}, \tag{25}$$

$$0 \leq U_{\max} \leq 1. \tag{26}$$

c) A logisztikai feladatok időparamétereinek meghatározása

A gyártási rendelésekhez kapcsolódó belső logisztikai feladatok a tervezett gyártási kezdési időpontok alapján határozhatók meg. A modellben a rendelések tervezett kezdési időpontja bemenő paraméter, ezért a logisztikai feladatok kiadási és legkésőbbi teljesítési időpontja nem döntési változó, hanem a kapcsolódó rendelés kezdési időpontjából származtatott időparaméter [S1]. Az f-edik logisztikai feladathoz tartozó rendelést az $r(f) \in R$ leképezés jelöli. A feladat kiadási időpontja:

$$\forall f \in F: e_f = t^0_{r(f)} - \theta_f, \tag{27}$$

ahol θ_f az f-edik logisztikai feladathoz tartozó feladatképzési előidő. Az összefüggés biztosítja, hogy a feladat a kapcsolódó rendelés tervezett kezdési időpontját megelőzően, a végrehajtásához szükséges előidő figyelembevételével kerüljön kiadásra.

Az f-edik logisztikai feladat legkésőbbi teljesítési időpontja:

$$\forall f \in F: b_f = t^0_{r(f)} - \delta_f, \tag{28}$$

ahol δ_f az f-edik feladathoz tartozó biztonsági időtartalék. A b_f paraméter azt a legkésőbbi időpontot határozza meg, ameddig a feladatot teljesíteni kell annak érdekében, hogy a szükséges anyag a rendelés tervezett kezdése előtt rendelkezésre álljon. A feladatképzési előidő és a biztonsági időtartalék alkalmazása az anyagszükséglet-tervezésből ismert biztonsági átfutási idő (safety lead time) elvét követi, amely elsősorban az időzítési bizonytalanság kezelésére alkalmas [P84, P85].

Az időparaméterekre a következő feltétel érvényes:

$$\forall f \in F: \theta_f \geq \delta_f \geq 0. \tag{29}$$

Ebből következik, hogy:

$$\forall f \in F: e_f \leq b_f \leq t^0_{r(f)}. \tag{30}$$

A feltétel szerint a logisztikai feladat kiadási időpontja nem lehet későbbi a legkésőbbi megengedett teljesítési időpontnál, továbbá a feladat teljesítési határidejének meg kell előznie, vagy legfeljebb el kell érnie a kapcsolódó rendelés tervezett kezdési időpontját..

A θ_f és δ_f paraméterek feladatonként eltérő értéket vehetnek fel. Ez lehetővé teszi az eltérő előkészítési, komissiózási, rakodási, szállítási és soroldali elhelyezési igényű logisztikai feladatok egységes modellben történő kezelését. A feladatok tényleges milk-run körhöz rendelését és végrehajtási sorrendjét a modell következő korlátozásai határozzák meg.

d) Logisztikai feladatok milk-run körökhöz rendelése

A logisztikai feladatokat milk-run alapú belső anyagellátási körökben hajtják végre [P64], [P86]. Minden olyan logisztikai feladatot, amely a gyártási rendelés tényleges gyártósor-

hozzárendelése alapján aktiválódik, pontosan egy milk-run körhöz kell rendelni, miközben figyelembe kell venni az egyes körök kapacitását és a rendelkezésre álló anyagkiszállító erőforrásokat.

$$\forall f \in F: \sum_{k \in K} g_{fk} = h_f \tag{31}$$

$$\forall k \in K: \sum_{f \in F^+} g_{fk} \leq N^+ a_k \tag{32}$$

$$\forall k \in K: \sum_{f \in F^-} g_{fk} \leq N^- a_k \tag{33}$$

$$\sum_{k \in K} a_k \leq H \tag{34}$$

Ezek a korlátozások előírják, hogy minden végrehajtandó logisztikai feladat pontosan egy milk-run körhöz kerüljön, az egyes körök feladatterhelése ne haladja meg a megengedett kapacitást, valamint az adott operatív döntési időablakban aktivált milk-run körök száma ne haladja meg a rendelkezésre álló anyagkiszállító erőforrások számát.

e) A logisztikai feladatok sorrendjének és végrehajtási útvonalának meghatározása

A milk-run körökhöz rendelt logisztikai feladatok végrehajtási sorrendjét úgy kell meghatározni, hogy minden aktív kör a 0-val jelölt kiindulási pontról induljon, a hozzárendelt logisztikai feladatokat pontosan egyszer érintse, majd visszatérjen a kiindulási pontra.
Az aktív milk-run kör pontosan egyszer indul el a kiindulási pontról:

$$\forall k \in K: \sum_{f \in F} x_{0fk} = a_k. \tag{35}$$

Az aktív milk-run kör pontosan egyszer tér vissza a kiindulási pontra:

$$\forall k \in K: \sum_{f \in F} x_{f0k} = a_k. \tag{36}$$

Minden, a k-adik milk-run körhöz rendelt logisztikai feladathoz pontosan egy kimenő útvonalszakasz tartozik:

$$\forall f \in F, k \in K: \sum_{\substack{g \in F \cup \{0\} \\ g \neq f}} x_{fgk} = g_{fk}. \tag{37}$$

Minden, a k-adik milk-run körhöz rendelt logisztikai feladathoz pontosan egy beérkező útvonalszakasz tartozik:

$$\forall f \in F, k \in K: \sum_{\substack{g \in F \cup \{0\} \\ g \neq f}} x_{gfk} = g_{fk}. \tag{38}$$

A feltételek a kiindulási pontra, valamint az egyes logisztikai feladatokhoz tartozó beérkező és kimenő útvonalszakaszokra vonatkozó követelményeket rögzítik. A zárt részútvonalak kizárására nincs szükség külön korlátozásra, mivel a (39) képletben megadott időbeli feltétel pozitív utazási idők esetén megakadályozza a kiindulási pontot nem érintő részkörök kialakulását [P87, P88].

f) Időbeli korlátozások

Az időbeli korlátozások biztosítják, hogy a logisztikai feladatok végrehajtása összhangban legyen a feladatok sorrendjével, a kiadási időpontokkal és a kapcsolódó gyártási rendelések tervezett kezdési időpontjaival.

$$\forall \boldsymbol{f, g} \in \boldsymbol{F}, \boldsymbol{f} \neq \boldsymbol{g}, \boldsymbol{k} \in \boldsymbol{K}: \boldsymbol{\tau_g} \geq \boldsymbol{\tau_f} + \boldsymbol{c_{fg}} - \boldsymbol{M}\left(\boldsymbol{1} - \boldsymbol{x_{fgk}}\right), \tag{39}$$

$$\forall f \in F, k \in K: \tau_f \geq e_f + c_{0f} - M\left(1 - x_{0fk}\right). \tag{40}$$

A korlátozás biztosítja, hogy amennyiben az f-edik logisztikai feladat egy milk-run kör első feladata, annak teljesítési időpontja figyelembe vegye a kiindulási ponttól a feladat teljesítéséig szükséges időt.

$$\forall f \in F: 0 \leq \tau_f \leq M h_f \tag{41}$$

$$\forall f \in F: E_f \geq \tau_f - e_f - M\left(1 - h_f\right) \tag{42}$$

$$\forall f \in F: E_f \leq \tau_f - e_f + M\left(1 - h_f\right) \tag{43}$$

$$\forall f \in F: 0 \leq E_f \leq M h_f \tag{44}$$

$$\forall f \in F: L_f \geq \tau_f - b_f - M\left(1 - h_f\right) \tag{45}$$

$$\forall f \in F: 0 \leq L_f \leq M h_f \tag{46}$$

$$\forall f \in F: \tau_f - b_f \leq M z_f + M\left(1 - h_f\right) \tag{47}$$

$$\forall f \in F: \tau_f - b_f \geq \varepsilon_z - M\left(1 - z_f\right) - M\left(1 - h_f\right) \tag{48}$$

$$\forall f \in F: z_f \leq h_f \tag{49}$$

$$\sum_{f \in F} E_f \leq E_{\max} \sum_{f \in F} h_f \tag{50}$$

$$\sum_{f \in F} z_f \leq (1 - \eta_{\min}) \sum_{f \in F} h_f \tag{51}$$

A gyártási rendelések tervezett kezdési időpontjában feltétlenül rendelkezésre álló anyagokhoz kapcsolódó kiszállítási feladatok esetében késedelem nem megengedett, mivel az a gyártás tervezett időpontban történő megkezdését akadályozná. Az F_{krit} halmazba tartozó feladatokra ezért a következő kiegészítő korlátozást alkalmazom:

$$\forall f \in F_{\text{krit}} \qquad z_f = 0 \tag{52}$$

A korlátozás biztosítja, hogy a gyártás megkezdéséhez nélkülözhetetlen, aktivált anyagkiszállítási feladatok a meghatározott határidőig teljesüljenek, miközben a többi logisztikai feladat esetében továbbra is alkalmazható az összesített szolgáltatásiszint-korlát.

Ezek a korlátozások biztosítják a logisztikai feladatok időbeli végrehajthatóságát, meghatározzák a reakcióidőt és a késést, valamint az előírt szolgáltatási szintre vonatkozó követelményt is érvényesítik. A modell így puha időablakokkal dolgozik: a legkésőbbi teljesítési időpont túllépése a nem kritikus feladatoknál megengedett, de a célfüggvényben büntetett, a kritikus feladatoknál viszont kemény korlátként érvényesül [P89]. A teljesítési időpont, a reakcióidő és a késés csak a vizsgált időhorizonton ténylegesen végrehajtott logisztikai feladatok esetében vesz fel pozitív értéket, amennyiben (h_f=0), az adott feladathoz tartozó (τ_f), (E_f), (L_f) és (z_f) változók értéke nulla.

g) Soroldali tárolókapacitás

A soroldali készletszint alakulását az adott gördülő döntési időhorizonton figyelembe vett anyagkiszállítási és gyártási anyagfelhasználási adatok határozzák meg. A modell a soroldali készletszintet a rendelkezésre álló tárolókapacitáshoz viszonyítja a teljes tervezési horizonton.

A soroldali készletszint időbeli alakulását a következő készletegyenlet írja le, amely a termeléstervezési MILP-modellek szokásos készletmérleg-összefüggését követi [P90]:

$$\forall l \in L, t \in T: B_{lt} = B_{l,t-1} + D_{lt} - U_{lt}, \tag{53}$$

ahol

- B_{lt} az l-edik gyártósor melletti soroldali készletszint a t-edik időintervallumban,
- D_{lt} az l-edik gyártósorra a t-edik időintervallumban kiszállított anyagmennyiség.

A D_{lt} és U_{lt} paraméterek az adott gördülő döntési időhorizont bemenő adatai. A D_{lt} értéke az l-edik gyártósorhoz kapcsolódó, az adott időintervallumban figyelembe vett anyagkiszállítási mennyiséget, míg az U_{lt} értéke az adott gyártósor tervezett anyagfelhasználását jelöli. Értékük minden új optimalizálási futtatás előtt az aktuális termelési terv és a rendelkezésre álló logisztikai státuszinformációk alapján aktualizálható. A készletkorlátok ebben a modellben a gördülő döntési horizont aktuális állapotának megvalósíthatósági ellenőrzését szolgálják, a D_{lt}és U_{lt}értékek exogén bemenő adatok, ezért a soroldali készletszint alakulását nem közvetlenül a milk-run útvonal- és sorrenddöntések határozzák meg.

A soroldali készletszint nem lehet negatív, és nem haladhatja meg a rendelkezésre álló tárolókapacitást:

$$\forall l \in L, t \in T: 0 \leq B_{lt} \leq C_l. \tag{54}$$

Ezek a korlátozások az előre megadott anyagkiszállítási és anyagfelhasználási adatok alapján ellenőrzik, hogy a soroldali készletszint a teljes tervezési időhorizonton belül a megengedett tartományban marad-e.

9.2.1.3. A modell típusa és megoldása

A bemutatott modell vegyes egészértékű lineáris programozási (Mixed Integer Linear Programming, MILP) feladat [P91]. A döntési változók között bináris és folytonos változók szerepelnek, míg a célfüggvények és a korlátozó feltételek lineárisak. A modell kétlépcsős optimalizálási eljárást alkalmaz. Az első lépésben a rendelkezésre álló erőforrások mellett maximalizálja a teljesíthető rendelési volument, majd a második lépésben a megengedett volumencsökkenés korlátjának betartásával optimalizálja a belső logisztikai folyamatok operatív teljesítményét. A logikai feltételek linearizálása nagy pozitív konstans (big-M) alkalmazásával történik. Az M értékét a feladat adataiból a lehető legkisebb érvényes értékre célszerű megválasztani, mert a szükségesnél nagyobb érték gyengíti a lineáris relaxációt és numerikus nehézségeket okozhat [P92, P93]. A modell korlátozás és szétválasztás (branch and bound) elvén működő MILP-megoldókkal egzakt módon megoldható [P93].

Nagyobb feladatméretnél heurisztikus eljárások, például adaptív nagy szomszédságú keresés alkalmazása mérsékelheti a számítási időt [P94, P95]. A gördülő horizonton történő operatív alkalmazás feltétele, hogy az adatfeldolgozás, az optimalizálás és az esetleges emberi jóváhagyás együttes időigénye beleférjen a rendelkezésre álló beavatkozási időablakba. Ennek teljesülését a konkrét feladatméret és megvalósítás mellett ellenőrizni kell.

9.2.2. Flexibilitási mutatók

A bemutatott matematikai modell az operatív döntések optimalizálása mellett a postponement logisztikai rendszer rugalmasságának számszerű értékeléséhez is alapot ad. A modell eredményeiből olyan mutatók vezethetők le, amelyek alkalmasak a rendszer rugalmasságának

különböző szempontok szerinti jellemzésére, valamint az eltérő működési konfigurációk és erőforrásszintek összehasonlítására.
A logisztikai rugalmasság értékelésekor meg kell különböztetni a rendszer által kezelhető változások terjedelmét, a változások végrehajtásának gyorsaságát és erőforrásigényét, valamint azt, hogy a rendszer teljesítménye mennyire marad egyenletes a különböző működési állapotokban. A szakirodalmi megközelítések [P25, P96] alapján ezek a flexibilitás terjedelmi, mobilitási és egyenletességi dimenzióinak feleltethetők meg. A terjedelmi dimenzió azt fejezi ki, hogy a rendszer milyen széles működési tartományban képes alkalmazkodni a változó igényekhez, a mobilitás a változtatások végrehajtásának gyorsaságát és ráfordításigényét jellemzi, míg az egyenletesség azt mutatja meg, hogy a rendszer teljesítménye mennyire marad stabil a működési feltételek változásai során.
Ennek megfelelően a matematikai modell eredményeinek értékelése nem korlátozható kizárólag a teljesíthető rendelési volumen vagy az erőforrás-kihasználás vizsgálatára. A logisztikai rugalmasság több szempontú jellemzéséhez olyan mutatórendszer alkalmazása indokolt, amely a flexibilitás különböző dimenzióit egyaránt figyelembe veszi. A továbbiakban a logisztikai flexibilitás mutatóit $LF_i\,(i = 1, \dots, 5)$ jelöléssel adom meg. Az LF_1 és LF_2 feladatalapú mutatók meghatározásakor kizárólag az Fhalmaz ténylegesen végrehajtott elemeit vesszük figyelembe.
A matematikai modellhez kapcsolódva az alábbi öt rugalmassági mutatót határoztam meg:

- LF_1 - határidőre teljesített logisztikai feladatok aránya,
- LF_2 - átlagos logisztikai reakcióidő,
- LF_3 - mixflexibilitás,
- LF_4 - volumenflexibilitás,
- LF_5 - logisztikai teljesítmény egyenletessége.

Az LF_1 és LF_2 mutatók a flexibilitás mobilitási dimenzióját jellemzik, az LF_3 és LF_4 mutatók a terjedelmi dimenzióhoz kapcsolódnak, míg az LF_5 mutató a rendszer teljesítményének egyenletességét fejezi ki. Ez a felosztás a rugalmasság terjedelmi, mobilitási és egyenletességi értelmezésére épül. A 6. fejezet kérdőíves vizsgálatában alkalmazott öt dimenzióval tartalmi kapcsolatban áll, de nem alkot velük egy-egy megfeleltetést [S1].

9.2.2.1. Határidőre teljesített logisztikai feladatok aránya (LF_1)

A digitálisan támogatott postponement logisztikai rendszer alapvető működési követelménye, hogy a logisztikai feladatok teljesítése a gyártási folyamat által meghatározott időablakon belül történjen. A késedelmes anyagellátás vagy visszaszállítás növelheti a gyártási várakozási időt, csökkentheti az erőforrások kihasználását, valamint kedvezőtlenül befolyásolhatja a rendszer működési teljesítményét.
A matematikai modellben minden logisztikai feladathoz egy bináris késedelmi változó (z_f) tartozik, amely a szolgáltatásiszint-korlát megfogalmazását támogatja. A határidőre teljesített logisztikai feladatok arányát a teljesítési időpontokhoz kapcsolódó z_f késedelmi változó alapján határozzuk meg:

$$LF_1 = \frac{\sum_{f \in F} (h_f - z_f)}{\sum_{f \in F} h_f}, \quad \sum_{f \in F} h_f > 0. \tag{55}$$

Az LF_1 mutató értéke a [0,1] intervallumba esik. Az $LF_1 = 1$ érték azt jelenti, hogy a vizsgált időszak valamennyi ténylegesen végrehajtott logisztikai feladata a megengedett időablakon belül teljesült, míg az alacsonyabb értékek a késedelmesen végrehajtott feladatok arányának növekedését jelzik. A mutató közvetlen kapcsolatban áll a matematikai modell szolgáltatásiszint-korlátjával, ezért felhasználható a különböző működési konfigurációk, erőforrás-kapacitások és irányítási stratégiák összehasonlítására. A digitális döntéstámogatás önálló hatása azonban csak megfelelő összehasonlítás mellett különíthető el.

9.2.2.2. Átlagos logisztikai reakcióidő (LF_2)

A logisztikai rendszer rugalmasságának egyik legfontosabb jellemzője, hogy milyen gyorsan képes reagálni a gyártási folyamat által generált anyagellátási igényekre. A rövidebb reakcióidő gyorsabb anyagellátásra utalhat, de a teljes működési teljesítményt más korlátok is befolyásolják, ezért az átlagos logisztikai reakcióidő a flexibilitás mobilitási dimenziójának egyik meghatározó mutatója [P97].
A matematikai modellben minden logisztikai feladathoz tartozik egy reakcióidő-változó (E_f), amely a feladat végrehajtásának időpontja és a feladat legkorábbi végrehajthatósági időpontja közötti időtartamot fejezi ki. Ennek megfelelően az átlagos logisztikai reakcióidő az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$LF_2 = \frac{\sum_{f \in F} E_f}{\sum_{f \in F} h_f}, \quad \sum_{f \in F} h_f > 0. \tag{56}$$

Az LF_2 mutató a ténylegesen végrehajtott logisztikai feladatok átlagos reakcióidejét fejezi ki. Az alacsonyabb LF_2 érték rövidebb átlagos feladatteljesítési időt jelez. A nagyobb értékek a logisztikai folyamatok lassabb reagálását jelzik, ami kedvezőtlenebb működési rugalmasságra utal.
Az LF_2 mutató közvetlenül a matematikai modell döntési változóiból származik, ezért alkalmas a különböző erőforrás-kapacitások, irányítási stratégiák és működési konfigurációk összehasonlítására. A mutató a logisztikai flexibilitás mobilitási dimenzióját jellemzi, mivel azt fejezi ki, hogy a rendszer milyen gyorsan képes alkalmazkodni a változó gyártási igényekhez és végrehajtani a szükséges logisztikai feladatokat.

9.2.2.3. Mixflexibilitás (LF_3)

A logisztikai rendszer egyik meghatározó rugalmassági jellemzője, hogy a rendelkezésre álló gyártósorok milyen mértékben képesek különböző terméktípusok előállítására. A több technológiailag alkalmas gyártósor bővíti a lehetséges hozzárendeléseket, ami kedvezőbb kapacitáselosztást és nagyobb tartalékot tehet lehetővé egyes sorok kiesése esetén. A mixflexibilitás ezért a rendszer strukturális rugalmasságának egyik, a gyártósori alkalmasságra épülő mutatója. A hivatkozott vizsgálat [P98] kimutatta, hogy a megfelelően konfigurált korlátozott flexibilitás - amikor egy gyártóegység csak néhány terméktípust állít elő, de a termékek és az egységek láncszerűen kapcsolódnak egymáshoz - a teljes flexibilitás előnyeinek nagy részét biztosítja.
Mivel a mixflexibilitás a rendszer technológiai adottságait jellemző strukturális mutató, meghatározása a rendelésállománytól függetlenül történik [S1]. Ennek megfelelően a mutató meghatározásához a terméktípusok P halmazát alkalmazzuk. A P halmaz kizárólag a

strukturális mixflexibilitás értékeléséhez kerül bevezetésre, és nem része az operatív optimalizálási modell döntési változóinak.
A mixflexibilitás abszolút mutatója az egy terméktípusra jutó átlagos technológiailag alkalmas gyártósorok számát fejezi ki:

$$LF_3 = \frac{\sum_{p \in P} \sum_{l \in L} A_{pl}}{| P |}, \tag{57}$$

ahol

- $| P |$ - a vizsgált terméktípusok száma.
- A_{pl} - technológiai alkalmassági paraméter, melynek értéke 1, ha a p-edik terméktípus az l-edik gyártósoron előállítható, egyébként 0.

Az LF_3 mutató értéke megmutatja, hogy egy terméktípus átlagosan hány különböző gyártósoron állítható elő. Az $LF_3 = 1$ érték azt jelenti, hogy minden terméktípus kizárólag egyetlen soron dolgozható fel, míg a nagyobb érték több alternatív gyártósori hozzárendelés lehetőségét jelzi.
A különböző méretű rendszerek objektív összehasonlításához célszerű egy normalizált mixflexibilitási mutató bevezetése is. A normalizálás során figyelembe kell venni, hogy minden terméktípusnak legalább egy technológiailag alkalmas gyártósorral rendelkeznie kell, ezért a flexibilitást nem az első, hanem az azon felüli alternatív feldolgozási lehetőségek fejezik ki. Ennek megfelelően a normalizált mixflexibilitási mutató a következőképpen definiálható:

$$LF_3^{norm} = \frac{\sum_{p \in P} \left(\sum_{l \in L} A_{pl} - 1 \right)}{| P | (| L | - 1)} \tag{58}$$

A normalizált mutató $| L | > 1$ esetén értelmezhető, és feltételezzük, hogy minden vizsgált terméktípus legalább egy gyártósoron előállítható. A normalizált mutató értéke a [0,1] intervallumba esik. Az $LF_3^{norm} = 0$ érték azt jelenti, hogy minden terméktípus kizárólag egyetlen soron dolgozható fel, vagyis nincs technológiai alternatíva, míg az $LF_3^{norm} = 1$ érték azt jelzi, hogy valamennyi terméktípus az összes rendelkezésre álló gyártósoron előállítható. A normalizált mutató segítheti az eltérő méretű gyártórendszerek és technológiai konfigurációk összehasonlítását.
Az LF_3 és LF_3^{norm} mutatók a logisztikai flexibilitás terjedelmi dimenzióját jellemzik, mivel azt fejezik ki, hogy a rendszer milyen széles technológiai tartományban képes alkalmazkodni a különböző termelési igényekhez. Míg az LF_3 a technológiai alternatívák átlagos számát mutatja meg közvetlenül, addig az LF_3^{norm} egységes, normalizált skálán teszi lehetővé a különböző rendszerek rugalmasságának összehasonlítását.

9.2.2.4. Volumenflexibilitás (LF_4)

A logisztikai rendszer egyik fontos rugalmassági jellemzője, hogy a rendelkezésre álló erőforrások felhasználásával milyen mértékben képes alkalmazkodni a változó termelési volumenhez. A volumenflexibilitás azt fejezi ki, hogy az anyagellátási rendszer mekkora rendelési mennyiséget képes kiszolgálni a vizsgált működési feltételek mellett, illetve hogyan változik ez a teljesítmény az erőforrások bővítése vagy szűkítése esetén. A volumenflexibilitás ezért a logisztikai rugalmasság terjedelmi dimenziójához kapcsolódó mutató [P99].
A bemutatott matematikai modell első optimalizálási célja a rendelkezésre álló erőforrások mellett teljesíthető rendelési volumen maximalizálása. A modell eredményeként minden

vizsgált erőforrás-konfigurációhoz meghatározható az elérhető maximális rendelési volumen, amelyet $Q_{\max}(H)$ jelöl, ahol H a rendelkezésre álló logisztikai erőforrások száma.
A volumenflexibilitás a referenciaállapothoz viszonyított relatív volumenváltozásként definiálható [S1]:

$$LF_4(H) = \frac{Q_{\max}(H) - Q_0}{Q_0}, \tag{59}$$

$$Q_0 = Q_{\max}(H_0) > 0 \tag{60}$$

ahol

- H_0 – referencia erőforrásszint,
- Q_0 - a referencia-erőforráskonfiguráció mellett teljesíthető maximális rendelési volumen.

Az $LF_4(H)$ mutató azt fejezi ki, hogy a referenciaállapothoz képest milyen mértékben változik a rendszer által teljesíthető rendelési volumen. Pozitív érték esetén az adott működési konfiguráció nagyobb rendelési volumen kiszolgálását teszi lehetővé, míg negatív érték a rendszer teljesítőképességének csökkenését jelzi. Az $LF_4(H) = 0$ érték azt mutatja, hogy a vizsgált konfiguráció teljesíthető rendelési volumene megegyezik a referenciaállapotéval.
A volumenflexibilitási mutató különböző erőforrás-konfigurációkra ismételten lefuttatott matematikai modell eredményei alapján határozható meg, ezért alkalmas a logisztikai rendszer alkalmazkodóképességének kvantitatív értékelésére, valamint különböző működési konfigurációk számszerű összehasonlítására. A mutató a logisztikai flexibilitás terjedelmi dimenzióját jellemzi, mivel azt fejezi ki, hogy a rendszer milyen mértékben képes alkalmazkodni a változó termelési volumenhez a rendelkezésre álló logisztikai erőforrások függvényében.

9.2.2.5. Teljesítmény-egyenletesség (LF_5)

A logisztikai rugalmasság értékelésénél azt is vizsgálni kell, mennyire marad stabil a rendszer teljesítménye eltérő működési feltételek mellett. A teljesítmény-egyenletesség azt fejezi ki, hogy a rendszer a termelési volumen, a termékmix, a rendelkezésre álló erőforrások vagy a működési környezet változásai mellett mennyire képes megőrizni szolgáltatási színvonalát. Az LF_5 mutató ezért a logisztikai flexibilitás egyenletességi dimenzióját jellemzi. Az egyenletesség azt fejezi ki, hogy a teljesítmény mennyire marad hasonló a működési tartományon belül [P25, P96]. A megközelítés rokon az ütemezési szakirodalom robusztussági mértékeivel, amelyek a terv teljesítményének zavarok utáni értékét és annak változékonyságát vizsgálják [P100, P101].
Az LF_5 mutató meghatározásához S jelöli a vizsgált működési állapotok halmazát, $s \in S$ az egyes állapotok indexét, míg $s = 0$ a referenciaállapotot. Az S halmaz kizárólag a teljesítmény-egyenletesség értékeléséhez kerül bevezetésre, és nem része az operatív optimalizálási modellnek.
A különböző működési állapotok összehasonlítása során a referenciaállapothoz viszonyított teljesítményromlás több részmutató alapján határozható meg. A volumenkiszolgálás mértékének jellemzésére a teljesített és az igényelt rendelési volumen hányadosát ($FR =$ teljesített volumen/igényelt volumen) alkalmazzuk. Az s-edik működési állapot összesített teljesítményromlása:

$$D_s = \lambda_1 d_{1s} + \lambda_2 d_{2s} + \lambda_3 d_{3s} \tag{61}$$

ahol

$$\mathrm{d_{1s}} = \max\left\{0, 1 - \frac{\mathrm{LF_{1,s}}}{\mathrm{LF_{1,0}}}\right\} \text{és} \quad LF_{1,0} > 0, \tag{62}$$

$$\mathrm{d_{2s}} = \max\left\{0, \frac{LF_{2,s}}{LF_{2,0}} - 1\right\} \quad \text{és} \quad LF_{2,0} > 0, \tag{63}$$

$$\mathrm{d_{3s}} = \max\left\{0, 1 - \frac{FR_s}{FR_0}\right\} \quad \text{és} \quad FR_0 > 0. \tag{64}$$

A jelölések:

- $s -$ a vizsgált működési állapot indexe,
- $LF_{1,s}$ – a határidőre teljesített logisztikai feladatok aránya az s-edik működési állapotban,
- $LF_{2,s}$ – az átlagos logisztikai reakcióidő az s-edik működési állapotban,
- $FR_s -$ a teljesített és az igényelt rendelési volumen hányadosa az s-edik működési állapotban,
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – az egyes részmutatók jelentőségét kifejező súlyok, amelyekre

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1, \;\; \lambda_j \geq 0 \tag{65}$$

feltételek érvényesek.

A részmutatók kizárólag a referenciaállapothoz viszonyított kedvezőtlen változásokat veszik figyelembe. Ennek megfelelően a határidőre teljesített feladatok arányának és a volumenkiszolgálási aránynak a csökkenése, valamint az átlagos reakcióidő növekedése növeli a teljesítményromlás értékét. Ha valamely teljesítményjellemző a referenciaállapothoz képest javul, az adott részmutató értéke nulla marad.

A teljesítmény-egyenletességi mutató a vizsgált működési állapotok súlyozott teljesítményromlása alapján a következőképpen definiálható:

$$LF_5 = 1 - \sum_{s \in S \setminus \{0\}} \omega_s \, D_s, \tag{66}$$

ahol

- S a vizsgált működési állapotok halmaza,
- ω_s az s-edik működési állapot jelentőségét kifejező súly.

A súlyokra

$$\sum_{s \in S \setminus \{0\}} \omega_s = 1, \quad \omega_s \geq 0 \tag{67}$$

feltételek érvényesek [S1].

Az LF_5 mutató magas értéke azt jelzi, hogy a rendszer teljesítménye a vizsgált működési állapotokban csak kis mértékben tér el a referenciaállapottól. Az alacsonyabb értékek nagyobb teljesítményromlást jeleznek, vagyis arra utalnak, hogy a rendszer érzékenyebben reagál a működési feltételek változásaira. Az LF_5 mutató értéke negatív is lehet, ha a referenciaállapothoz viszonyított teljesítményromlás meghaladja az egységet.

Az LF_5 mutató felhasználható eltérő erőforrás-szintek, volumencsúcsok, termékmix-változások, gyártósor-kiesések, valamint útvonal- vagy csomóponti zavarok hatásának összehasonlítására. A mutató így átfogóan fejezi ki, hogy a rendszer milyen mértékben képes fenntartani szolgáltatási színvonalát különböző működési feltételek mellett.

9.2.3. Összegzés és tézis

A bemutatott matematikai modell és a belőle levezetett flexibilitási mutatók egységes keretet biztosítanak a digitálisan támogatott postponement logisztikai rendszer operatív optimalizálására és rugalmasságának kvantitatív értékelésére.
A fentiek alapján a következő tudományos tézist fogalmazom meg:

V. TÉZIS - A digitalizált postponement rendszer operatív optimalizálása és flexibilitásának kvantitatív értékelése
Kidolgoztam a digitalizált postponement logisztikai rendszer integrált operatív optimalizálási modelljét, amely összehangoltan kezeli a gyártási rendelések gyártósorokhoz történő hozzárendelését, a kapcsolódó belső logisztikai feladatok ütemezését és a milk-run alapú anyagellátást az erőforrás-, kapacitás-, technológiai és időbeli korlátok figyelembevételével. A modellhez kapcsolódóan egy olyan flexibilitási mutatószámrendszert dolgoztam ki, amely a határidőre teljesített logisztikai feladatok aránya, az átlagos logisztikai reakcióidő, a mix- és volumenflexibilitás, valamint a teljesítmény-egyenletesség alapján lehetővé teszi a postponement logisztikai rendszer alkalmazkodóképességének kvantitatív értékelését [S1].

10. ÖSSZEFOGLALÁS

Értekezésemben azt vizsgáltam, hogy az Ipar 4.0 és a digitalizáció milyen módon támogathatja a logisztikai rugalmasság növelését nagy keresleti bizonytalanság mellett. A kutatás középpontjában a vállalati digitális fejlettség, a logisztikai alkalmazkodóképesség és a halasztási stratégia kapcsolata állt. A halasztás a termék végső kialakítását vagy egyes logisztikai műveleteket olyan időpontra helyezi át, amikor pontosabb keresleti információk állnak rendelkezésre. A stratégia alkalmazásához a későbbi döntéseket a rendelkezésre álló végrehajtási idővel és erőforrásokkal kell összehangolni.

A kutatás elméleti alapját a hazai és nemzetközi szakirodalom feldolgozása, valamint a Scopus adatbázisra épülő tudománymetriai elemzés adta. A publikációs trendek, a témák együttes előfordulása és relatív publikációs intenzitása alapján azonosítottam a további vizsgálatot igénylő kapcsolódási területeket. Az empirikus elemzéshez egy 2025-ben végzett kérdőíves felmérés adatait használtam fel, amely 27 vállalat egy-egy döntéshozó válaszára épült. Leíró statisztikai és összefüggésvizsgálati módszereket, nemparaméteres próbákat, klaszterelemzést és SWOT-elemzést alkalmaztam.

A vállalati önértékelések alapján a logisztikai rugalmasság leginkább a változó szállítási igények kezelésében, valamint a fennakadások esetén igénybe vehető alternatív útvonalak és megoldások alkalmazásában mutatkozott meg. A hirtelen keresleti volumenváltozásokhoz való alkalmazkodás korlátozottabbnak bizonyult. A válaszadók az anyagi, humán és technológiai erőforrások hiányát jelölték meg a rugalmasság fejlesztésének fő akadályaként. A válaszadók értékelése szerint a digitalizáció elsősorban a gyorsabb információáramlást, a hatékonyabb készletkezelést és a rövidebb reakcióidőt támogatja.

A halasztási stratégiát a válaszadók egyharmada alkalmazta, leggyakrabban a termékek végszerelése és csomagolása során. A fő célok a készletek csökkentése, a keresletingadozások kezelése és az ügyfélspecifikus igények kielégítése voltak. A stratégia megvalósítását az integrált információs rendszerek és az összehangolt logisztikai folyamatok támogathatják, alkalmazását ugyanakkor erőforrás-, technológiai és szervezeti korlátok nehezítik. Az egyes Ipar 4.0 technológiák megléte és a halasztás alkalmazása között a vizsgált mintában nem mutatkozott statisztikailag szignifikáns összefüggés.

A digitális fejlettség összehasonlítható értékelésére kidolgoztam a nyolc komponensből álló Digitális Fejlettségi Indexet (DFI). Az index a stratégiai, technológiai, adaptív és attitűdbeli dimenziókat egységes, 0-10 közötti skálán értékeli. A logisztikai gyakorlatokat közvetlenül mérő tételeket nem tartalmazza, így a logisztikai gyakorlatokkal való kapcsolat vizsgálata nem épül ugyanazon változók közvetlen ismételt felhasználására. A DFI-ből rögzített határértékekkel háromfokozatú Digitális Fejlettségi Szintet (DFS) képeztem. A 27 válasz átlagos indexértéke 6,17 volt, négy értékelés alacsony, tizenhat közepes és hét magas fejlettségi szintbe került.

Az index szerinti rangsor a vizsgált súlyozási változatok mellett lényegében stabil maradt. A csoportösszehasonlítások a digitális fejlettség és a digitalizációs stratégia stádiuma, a vállalatméret, valamint a tulajdonosi háttér között szignifikáns összefüggéseket jeleztek. A külföldi tulajdonú vállalatok előnye főként a fejlett eszközökben és a rendszerintegrációban jelentkezett. Négy leíró digitális profilt különítettem el. A profilok közötti különbségek elsősorban az Ipar 4.0 technológiák alkalmazásában, a rendszerintegrációban, valamint a digitális láthatóság és átláthatóság szintjében mutatkoztak meg.

A vállalati vizsgálatot követően kidolgoztam a digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modelljét. A modell a digitális információs és döntéstámogató réteget a fizikai végrehajtással visszacsatolt irányítási körben kapcsolja össze. A fizikai folyamatot a beérkeztetés és tárolás, a gyártáselőkészítés, a gyártáskiszolgálás, a végső konfigurálás és a késztermékkezelés szakaszaira bontottam. Megkülönböztettem a termékváltozatról hozott döntés időpontját, az anyagok rendeléshez kötését és a fizikai differenciálás kezdetét. Ez a megkülönböztetés szemlélteti, hogyan támogathatja az információs késedelem csökkentése és a feladatok összehangolása a későbbi változatdöntést a teljesítési határidő megtartásával.
A működési modellhez kapcsolódva vegyes egészértékű lineáris programozási (MILP) modellt dolgoztam ki a rendelések gyártó- és csomagolósorokhoz rendelésére, valamint a belső logisztikai feladatok időzítésére és milk-run körökbe szervezésére. A gyártási rendelések tervezett kezdési időpontja bemenő adat, az optimalizálás az erőforrás-, kapacitás-, technológiai és időbeli korlátokat figyelembe véve történik. Az optimalizálás első lépése az előírt szolgáltatási szint mellett teljesíthető rendelési volument maximalizálja. A második lépés az így meghatározott volumenhez képest megengedett eltérésen belül a késések, a reakcióidő, a szállítási távolság, az indított körök száma és a gyártósorok maximális kapacitáskihasználása alapján optimalizálja az operatív működést.
A rendszer alkalmazkodóképességének számszerű értékelésére öt flexibilitási mutatót határoztam meg: a határidőre teljesített logisztikai feladatok arányát, az átlagos logisztikai reakcióidőt, a mixflexibilitást, a volumenflexibilitást és a logisztikai teljesítmény egyenletességét. Ezek a rugalmasság mobilitási, terjedelmi és egyenletességi dimenzióit jellemzik. A mutatórendszer lehetővé teszi az eltérő technológiai adottságok, erőforrásszintek és működési állapotok összehasonlítását, valamint a szolgáltatási színvonal és a teljesíthető volumen együttes értékelését.
Az értekezés eredményei a vállalati digitális fejlettség mérését a postponement rendszer működésének leírásával és operatív döntéstámogatásával kapcsolják össze. A digitális információk hasznosulását az adatminőség, a folyamatok összehangolása és a tényleges beavatkozási lehetőségek együttesen határozzák meg. Az empirikus következtetések a kis, nem reprezentatív, önértékelésre épülő mintára korlátozódnak, és nem teszik lehetővé oksági kapcsolatok igazolását. A további kutatás lehetséges irányai közé tartozik a DFI nagyobb mintán és objektív adatokkal történő validálása, valamint a működési és optimalizálási modell üzemi adatokon végzett ellenőrzése.

11. SUMMARY

In my dissertation, I investigated how Industry 4.0 and digitalisation can contribute to improving logistics flexibility under conditions of high demand uncertainty. The research focused on the relationships between corporate digital development, logistics adaptability, and the postponement strategy. Postponement involves delaying final product configuration or certain logistics operations until more accurate demand information becomes available. Implementing this strategy requires decisions made later in the process to be coordinated with the available execution time and resources.

The theoretical foundation of the research was established through a review of Hungarian and international literature and a scientometric analysis based on the Scopus database. By examining publication trends, the co-occurrence of research topics, and their relative publication intensity, I identified areas of intersection requiring further investigation. The empirical analysis was based on a questionnaire survey conducted in 2025, comprising 27 responses from decision-makers in Hungary. The research methods included descriptive statistics, analyses of relationships between variables, non-parametric statistical tests, cluster analysis, and SWOT analysis.

Based on the corporate self-assessments, logistics flexibility was most evident in the ability to respond to changing transportation requirements and to use alternative routes and solutions in the event of disruptions. The ability to adapt to sudden changes in demand volume was more limited. Respondents identified shortages of financial, human, and technological resources as the main barriers to improving logistics flexibility. According to their assessments, digitalisation primarily supports faster information flows, more efficient inventory management, and shorter response times.

One-third of the respondents reported applying the postponement strategy, most frequently in final product assembly and packaging. The main objectives were to reduce inventories, manage demand fluctuations, and meet customer-specific requirements. Integrated information systems and coordinated logistics processes can support the implementation of postponement, while resource-related, technological, and organisational constraints may hinder its adoption. No statistically significant association was identified in the sample between the use of individual Industry 4.0 technologies and the adoption of postponement.

To enable a comparative assessment of corporate digital development, I developed the eight-component Digital Development Index (DFI). The index evaluates strategic, technological, adaptive, and attitudinal dimensions on a common scale from 0 to 10. It does not include items that directly measure logistics practices, allowing their relationships with digital development to be examined without directly reusing the same variables in both measures. Based on the DFI, I established a three-level Digital Development Level (DFS) classification using fixed thresholds. The mean DFI score across the 27 responses was 6.17. Four assessments were classified as low, sixteen as medium, and seven as high in digital development.

The ranking based on the index remained largely stable across the weighting schemes examined. Group comparisons revealed statistically significant associations between digital development and the stage of digitalisation strategy implementation, company size, and ownership structure. The advantage observed among foreign-owned companies was primarily associated with the adoption of advanced technologies and systems integration. I identified four descriptive digital profiles. Differences between these profiles were mainly reflected in the

adoption of Industry 4.0 technologies, the degree of systems integration, and the levels of digital visibility and transparency.

Following the corporate-level analysis, I developed a general operational model of a digitalised postponement logistics system. The model connects the digital information and decision-support layer with the physical execution layer through a closed-loop control structure. I divided the physical process into five stages: goods receiving and storage, production preparation, production-line supply, final configuration, and finished-goods handling. I distinguished between the timing of the product variant decision, the allocation of materials to specific orders, and the start of physical product differentiation. This distinction illustrates how reducing information delays and coordinating operational tasks can support later product variant decisions while maintaining the required delivery deadlines.

Building on the operational model, I developed a mixed-integer linear programming (MILP) model for assigning orders to manufacturing and packaging lines, scheduling internal logistics tasks, and organising them into milk-run routes. The planned start times of production orders are treated as input parameters, while the optimisation considers resource, capacity, technological, and time-related constraints. The first optimisation stage maximises the order volume that can be fulfilled while maintaining the required service level. In the second stage, operational performance is optimised within a permissible deviation from the order volume determined in the first stage, considering delays, response times, transport distances, the number of milk-run routes dispatched, and the maximum capacity utilisation of production lines.

To quantitatively assess the system's adaptability, I defined five flexibility indicators: the proportion of logistics tasks completed on time, the average logistics response time, mix flexibility, volume flexibility, and the uniformity of logistics performance. These indicators characterise the mobility, range, and uniformity dimensions of flexibility. The indicator system enables comparisons between different technological configurations, resource levels, and operating conditions, as well as the joint assessment of service levels and achievable order volumes.

The results of the dissertation link the measurement of corporate digital development with the operational description and decision support of a postponement logistics system. The effective use of digital information depends on data quality, process coordination, and the availability of opportunities for operational intervention. The empirical findings are limited to a small, non-representative sample based on self-assessments and do not establish causal relationships. Potential directions for further research include validating the DFI using larger samples and objective data, as well as evaluating the operational and optimisation models using real-world manufacturing data.

12. AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

I. TÉZIS - A logisztikai rugalmasság vállalati jellemzői
A hazai és nemzetközi szakirodalom tanulmányozása, valamint a magyarországi iparvállalatok körében végzett empirikus vizsgálat alapján feltártam a logisztikai rugalmasság meghatározó dimenzióit, valamint a keresleti bizonytalansághoz való alkalmazkodást támogató és korlátozó tényezőket. Megállapítottam, hogy a vizsgált vállalati mintában a logisztikai rugalmasság elsősorban a szállítási rugalmasság és a fennakadások esetén alkalmazható alternatív útvonalak és megoldások területén érvényesül, míg a hirtelen keresleti volumenváltozásokhoz való alkalmazkodás korlátozottabb, ugyanakkor a digitalizáció és az Ipar 4.0 technológiák szerepe a gyorsabb információáramlás, a rövidebb reakcióidő és a hatékonyabb készletkezelés támogatásában mutatkozik meg. [S2, S4, S6, S7]

II. TÉZIS - A postponement stratégia, a digitalizáció és a logisztikai rugalmasság kapcsolata
A vizsgált vállalati mintán feltártam a postponement stratégia, a vállalati digitalizáció és a logisztikai rugalmasság közötti kapcsolatokat. Megállapítottam, hogy a stratégia megvalósítását a digitális információk rendelkezésre állása, az integrált információs rendszerek és a rugalmas logisztikai folyamatok támogatják, míg alkalmazását elsősorban erőforrás-, technológiai és szervezeti korlátok nehezítik. [S2, S3, S5]

III. TÉZIS - A Digitális Fejlettségi Index kidolgozása és validálása
Kidolgoztam a vállalati digitális fejlettség kérdőíves mérésére szolgáló, nyolc komponensből álló Digitális Fejlettségi Indexet (DFI) és az abból rögzített határértékekkel képzett Digitális Fejlettségi Szintet (DFS). Ezek a digitalizáció stratégiai, technológiai, adaptív és attitűdbeli dimenzióit egységes skálán értékelik, a logisztikai gyakorlatokat pedig szándékosan nem tartalmazzák, így azok magyarázó változójaként alkalmazhatók. Kimutattam, hogy a DFI szerinti rangsor a vizsgált súlyozási változatok mellett robusztus, és az index a vizsgált mintában statisztikailag szignifikáns különbségeket mutat a digitalizációs stratégia stádiumai, a vállalatméret és a tulajdonosi háttér szerinti csoportok között. Az eredmények alátámasztják az index ismert csoportok szerinti érvényességét. [S2, S4, S6, S7]

IV. TÉZIS - A digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modellje
Kidolgoztam a digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modelljét, amely egységes rendszerben írja le a postponement stratégia megvalósításához szükséges anyag-, információ- és döntési folyamatokat, valamint a digitális megoldások ezekben betöltött szerepét. Meghatároztam a rendszer digitális információs és döntéstámogató, valamint fizikai végrehajtási rétegét, azok kapcsolatait, továbbá a postponement megvalósítását befolyásoló erőforrásokat és működési korlátokat. [S1]

V. TÉZIS - A digitalizált postponement rendszer operatív optimalizálása és flexibilitásának kvantitatív értékelése

Kidolgoztam a digitalizált postponement logisztikai rendszer integrált operatív optimalizálási modelljét, amely összehangoltan kezeli a gyártási rendelések gyártósorokhoz történő hozzárendelését, a kapcsolódó belső logisztikai feladatok ütemezését és a milk-run alapú anyagellátást az erőforrás-, kapacitás-, technológiai és időbeli korlátok figyelembevételével. A modellhez kapcsolódóan egy olyan flexibilitási mutatószámrendszert dolgoztam ki, amely a határidőre teljesített logisztikai feladatok aránya, az átlagos logisztikai reakcióidő, a mix- és volumenflexibilitás, valamint a teljesítmény-egyenletesség alapján lehetővé teszi a postponement logisztikai rendszer alkalmazkodó képességének kvantitatív értékelését [S1].

13. THESES OF THE DISSERTATION

THESIS I - Firm-Level Characteristics of Logistics Flexibility
Based on a review of the Hungarian and international scientific literature and an empirical study conducted among industrial companies in Hungary, I identified the key dimensions of logistics flexibility, as well as the factors that facilitate or constrain adaptation to demand uncertainty. I found that, within the surveyed sample of companies, logistics flexibility is primarily reflected in transportation flexibility and the availability of alternative routes and solutions in the event of disruptions, whereas the ability to respond to sudden changes in demand volume is more limited. At the same time, digitalisation and Industry 4.0 technologies contribute to faster information flows, shorter response times, and more effective inventory management. [S2, S4, S6, S7]

THESIS II - Relationships between the Postponement Strategy, Digitalisation and Logistics Flexibility
Within the sample of companies studied, I identified the relationships between the postponement strategy, corporate digitalisation and logistics flexibility. I found that the implementation of this strategy is supported by the availability of digital information, integrated information systems and flexible logistics processes, while its adoption is hindered primarily by resource, technological and organisational constraints. [S2, S3, S5]

THESIS III - Development and Validation of the Digital Development Index
I developed an eight-component Digital Development Index (DFI, retaining the Hungarian abbreviation) for the questionnaire-based assessment of corporate digital development and a corresponding Digital Develeopment Level (DFS, retaining the Hungarian abbreviation) classification derived from the index using fixed thresholds. These measures assess the strategic, technological, adaptive, and attitudinal dimensions of digitalisation on a common scale. Logistics practices are deliberately excluded, allowing the measures to be used as explanatory variables for such practices. I demonstrated that the ranking based on the DMI is robust across the weighting schemes examined and that, within the sample studied, the index shows statistically significant differences between groups defined by digitalisation strategy stage, company size, and ownership background. The findings support the known-groups validity of the index. [S2, S4, S6, S7]

THESIS IV - A General Operational Model of a Digitalised Postponement Logistics System
I developed a general operational model of a digitalised postponement logistics system that describes, within a unified framework, the material flows, information flows and decision-making processes required to implement the postponement strategy, together with the roles of digital solutions in these processes. I defined the system’s digital information and decision-support layer and its physical execution layer, the relationships between these layers, and the resources and operational constraints that influence the implementation of postponement. [S1]

THESIS V - Operational Optimisation and Quantitative Assessment of the Flexibility of a Digitalised Postponement System

I developed an integrated operational optimisation model of a digitalised postponement logistics system that coordinates the assignment of production orders to production lines, the scheduling of associated internal logistics tasks and milk-run-based material supply, taking resource, capacity, technological and time constraints into account. In conjunction with this model, I developed a system of flexibility indicators that enables a quantitative assessment of the adaptability of the postponement logistics system based on the proportion of logistics tasks completed on time, average logistics response time, mix and volume flexibility, and performance uniformity. [S1]

14. IRODALOMJEGYZÉK

14.1. Az értekezés témakörében használt saját publikációk

[S1] Járvás, T., Illés, B., Bányai, Á. (2026): Integrated MILP-based optimization and flexibility assessment of a digitally supported postponement logistics system. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice*, 20(3), 71-94. https://doi.org/10.32971/als.2026.016

[S2] Járvás, T., Illés, B., Bányai, Á. (2026): The role of postponement strategy in modern logistics: Practical applications and the impact of digitalization. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. (megjelenés alatt) https://m2.mtmt.hu/gui2/?mode=browse&params=publication;37419713

[S3] Járvás, T., Illés, B., Bányai, Á. (2025): Uncertainty factors in supply chains. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice,* 19(1), 53-60. https://doi.org/10.32971/als.2025.005

[S4] Járvás, T. (2024): Az Ipar 4.0 technológiák szerepe a logisztikai rendszerek optimalizálásában. In: *Doktoranduszok fóruma: Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa*, pp. 35-40. https://m2.mtmt.hu/gui2/?mode=browse&params=publication;36896467

[S5] Járvás, T., Illés, B., Bányai, Á. (2023): Ellátási láncok bizonytalansági tényezői. In: Barabás I. (szerk.): *OGÉT 2023: XXXI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia*, Kolozsvár, Románia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, pp. 264-267. https://m2.mtmt.hu/gui2/?mode=browse&params=publication;33809789

[S6] Járvás, T., Illés, B., Bányai, Á. (2023): Automatizálás hatása a logisztikai rugalmasságra. In: Barabás I. (szerk.): *OGÉT 2023: XXXI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia*, Kolozsvár, Románia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, pp. 268-273. https://m2.mtmt.hu/gui2/?mode=browse&params=publication;33809798

[S7] Járvás, T., Illés, B., Bányai, Á. (2023): Impact of Industry 4.0 elements on logistics flexibility. In: Bölkény, I., Abonyi, J., Trohák, A., Vadászi, M., Dakhel, Y., Forgács, Z., Reda, A., Szabó. G. (Eds.): *PCS Science 2023: Konferencia kiadvány*, pp. 38-48. https://m2.mtmt.hu/gui2/?mode=browse&params=publication;34788404

[S8] Járvás, T., Illés, B., Bányai, Á. (2022): Alapanyagokra számított kanban lefedettség meghatározása. In: Cservenák Á., Szentesi Sz. (szerk.): *Digitális technológiák szerepe a logisztikai folyamatok előrejelzésében*. Miskolci Egyetem, Logisztikai Intézet, pp. 6-13. https://m2.mtmt.hu/gui2/?mode=browse&params=publication;33284123

14.2. Az értekezés témakörében használt idegen publikációk

[P1] Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M., Wahlster, W. (szerk.) (2017): Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies. acatech STUDY, Herbert Utz Verlag, München. https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-die-digitale-transformation-von-unternehmen-gestalten/

[P2] Jafari, H., Eslami, M. H., Paulraj, A. (2022): Postponement and logistics flexibility in retailing: The moderating role of logistics integration and demand uncertainty. International Journal of Production Economics, 243, 108319. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108319

[P3] Tonsi, A. A., Husain, K. S. M., Yaqub, M. Z. (2025): IT Capabilities' Impact on Postponement and Supply Chain Viability of Retail Manufacturers: A Dynamic Resource-Based View. Sustainability, 17(4), 1437. https://doi.org/10.3390/su17041437

[P4] Kazancoglu, I., Ozbiltekin-Pala, M., Mangla, S. K., Kazancoglu, Y., Jabeen, F. (2022): Role of flexibility, agility and responsiveness for sustainable supply chain resilience during COVID-19. Journal of Cleaner Production, 362, 132431. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132431

[P5] Lee, H. L., Padmanabhan, V., Whang, S. (1997): Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. Management Science, 43(4), 546-558. https://doi.org/10.1287/mnsc.43.4.546

[P6] Lee, H. L., So, K. C., Tang, C. S. (2000): The Value of Information Sharing in a Two-Level Supply Chain. Management Science, 46(5), 626-643. https://doi.org/10.1287/mnsc.46.5.626.12047

[P7] Cachon, G. P., Fisher, M. (2000): Supply Chain Inventory Management and the Value of Shared Information. Management Science, 46(8), 1032-1048. https://doi.org/10.1287/mnsc.46.8.1032.12029

[P8] Kingman, J. F. C. (1962): On Queues in Heavy Traffic. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 24(2), 383-392. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1962.tb00465.x

[P9] Galbraith, J. R. (1974): Organization Design: An Information Processing View. Interfaces, 4(3), 28-36. https://doi.org/10.1287/inte.4.3.28

[P10] Howard, R. A. (1966): Information Value Theory. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 2(1), 22-26. https://doi.org/10.1109/TSSC.1966.300074

[P11] Raghunathan, S. (2001): Information Sharing in a Supply Chain: A Note on its Value when Demand Is Nonstationary. Management Science, 47(4), 605-610. https://doi.org/10.1287/mnsc.47.4.605.9833

[P12] Culot, G., Nassimbeni, G., Orzes, G., Sartor, M. (2020): Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. International Journal of Production Economics, 226, 107617. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107617

[P13] Monostori, L. (2014): Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. Procedia CIRP, 17, 9-13. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115

[P14] Frank, A. G., Dalenogare, L. S., Ayala, N. F. (2019): Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. International Journal of Production Economics, 210, 15-26. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004

[P15] Winkelhaus, S., Grosse, E. H. (2020): Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. International Journal of Production Research, 58(1), 18-43. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1612964

[P16] Qu, T., Lei, S. P., Wang, Z. Z., Nie, D. X., Chen, X., Huang, G. Q. (2016): IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(1-4), 147-164. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7220-1

[P17] Az acatech Ipar 4.0 érettségi index (forrás: Német Nemzeti Tudományos és Mérnöki Akadémia,https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf

[P18] Verhoef, P. C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Dong, J. Q., Fabian, N., Haenlein, M. (2021): Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. Journal of Business Research, 122, 889-901. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.022

[P19] Schumacher, A., Erol, S., Sihn, W. (2016): A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. Procedia CIRP, 52, 161-166. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040

[P20] Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., Wuest, T. (2018): A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). Journal of Manufacturing Systems, 49, 194-214. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005

[P21] Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., ten Hompel, M. (szerk.) (2020): Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies - Update 2020. acatech STUDY, acatech, München. https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/

[P22] OECD, European Union, EC-JRC (2008): Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/9789264043466-en

[P23] Plattform Industrie 4.0 (2018): RAMI 4.0 referenciamodell - az értekezés 5. ábrájához megjelölt forrás. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html

[P24] Jafari, H. (2015): Logistics flexibility: a systematic review. International Journal of Productivity and Performance Management, 64(7), 947-970. https://doi.org/10.1108/IJPPM-05-2014-0069

[P25] Upton, D. M. (1994): The Management of Manufacturing Flexibility. California Management Review, 36(2), 72-89. https://doi.org/10.2307/41165745

[P26] Bernardes, E. S., Hanna, M. D. (2009): A theoretical review of flexibility, agility and responsiveness in the operations management literature: Toward a conceptual definition of customer responsiveness. International Journal of Operations & Production Management, 29(1), 30-53. https://doi.org/10.1108/01443570910925352

[P27] Gligor, D., Gligor, N., Holcomb, M., Bozkurt, S. (2019): Distinguishing between the concepts of supply chain agility and resilience: A multidisciplinary literature review. The International Journal of Logistics Management, 30(2), 467-487. https://doi.org/10.1108/IJLM-10-2017-0259

[P28] Swafford, P. M., Ghosh, S., Murthy, N. (2008): Achieving supply chain agility through IT integration and flexibility. International Journal of Production Economics, 116(2), 288-297. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.09.002
[P29] Enrique, D. V., Lerman, L. V., de Sousa, P. R., Benitez, G. B., Bigares Charrua Santos, F. M., Frank, A. G. (2022): Being digital and flexible to navigate the storm: How digital transformation enhances supply chain flexibility in turbulent environments. International Journal of Production Economics, 250, 108668. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108668
[P30] van Hoek, R. I. (2001): The rediscovery of postponement a literature review and directions for research. Journal of Operations Management, 19(2), 161-184. https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00057-7
[P31] Swaminathan, J. M., Tayur, S. R. (1998): Managing Broader Product Lines through Delayed Differentiation Using Vanilla Boxes. Management Science, 44(12, Part 2), S161-S172. https://doi.org/10.1287/mnsc.44.12.S161
[P32] Graman, G. A. (2010): A partial-postponement decision cost model. European Journal of Operational Research, 201(1), 34-44. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.03.001
[P33] Sony, M., Naik, S. (2020): Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: A systematic review and proposed theoretical model. Technology in Society, 61, 101248. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101248
[P34] Perotti, S., Bastidas Santacruz, R. F., Bremer, P., Beer, J. E. (2022): Logistics 4.0 in warehousing: a conceptual framework of influencing factors, benefits and barriers. The International Journal of Logistics Management, 33(5), 193-220. https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2022-0068
[P35] Wang, R. Y., Strong, D. M. (1996): Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. Journal of Management Information Systems, 12(4), 5-33. https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518099
[P36] Zeid, A., Sundaram, S., Moghaddam, M., Kamarthi, S., Marion, T. (2019): Interoperability in Smart Manufacturing: Research Challenges. Machines, 7(2), 21. https://doi.org/10.3390/machines7020021
[P37] Horváth, D., Szabó, R. Zs. (2019): Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? Technological Forecasting and Social Change, 146, 119-132. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021
[P38] Hansen, A. K., Christiansen, L., Lassen, A. H. (2025): Technology isn't enough for Industry 4.0: on SMEs and hindrances to digital transformation. International Journal of Production Research, 63(18), 6585-6605. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2305800
[P39] Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., Watson, T. (2018): The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. Computers in Industry, 101, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015
[P40] Alderson, W. (1950): Marketing efficiency and the principle of postponement. Cost and Profit Outlook, 3, szeptember.
[P41] Bucklin, L. P. (1965): Postponement, Speculation and the Structure of Distribution Channels. Journal of Marketing Research, 2(1), 26-31. https://doi.org/10.1177/002224376500200103

[P42] Yang, B., Burns, N. D., Backhouse, C. J. (2004): Postponement: a review and an integrated framework. International Journal of Operations & Production Management, 24(5), 468-487. https://doi.org/10.1108/01443570410532542
[P43] Tang, C. S. (2006): Perspectives in supply chain risk management. International Journal of Production Economics, 103(2), 451-488. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006
[P44] Bajor, I., Torok, A., Rožić, T., Novačko, L. (2024): The EU Logistics Sector. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 52(3), 229-234. https://doi.org/10.3311/PPtr.23694
[P45] El Hamdi, S., Abouabdellah, A. (2022): Logistics: Impact of Industry 4.0. Applied Sciences, 12(9), 4209. https://doi.org/10.3390/app12094209
[P46] Eslami, M. H., Jafari, H., Achtenhagen, L., Carlbäck, J., Wong, A. (2024): Financial performance and supply chain dynamic capabilities: the moderating role of Industry 4.0 technologies. International Journal of Production Research, 62(22), 8092-8109. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1966850
[P47] Forza, C. (2002): Survey research in operations management: a process-based perspective. International Journal of Operations & Production Management, 22(2), 152-194. https://doi.org/10.1108/01443570210414310
[P48] Központi Statisztikai Hivatal (é. n.): Külföldi irányítású vállalkozások Magyarországon, 2018. KSH, Budapest. https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/pdf/kulfleany18.pdf (Hozzáférés: 2026. november 7.)
[P49] Christopher, M. (2016): Logistics & Supply Chain Management. 5. kiadás, Pearson, Harlow. ISBN 9781292083797. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292083810_A26571390/preview-9781292083810_A26571390.pdf
[P50] Barney, J. B. (1995): Looking inside for competitive advantage. Academy of Management Executive, 9(4), 49-61. https://doi.org/10.5465/ame.1995.9512032192
[P51] Prataviera, L. B., Perotti, S., Melacini, M., Moretti, E. (2020): Postponement Strategies for Global Downstream Supply Chains: A Conceptual Framework. Journal of Business Logistics, 41(2), 94-110. https://doi.org/10.1111/jbl.12250
[P52] Grech, V. (2018): WASP (Write a Scientific Paper) using Excel - 2: Pivot tables. Early Human Development, 117, 104-109. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2018.01.003
[P53] Washington, S., Karlaftis, M. G., Mannering, F., Anastasopoulos, P. (2020): Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis. 3. kiadás, Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group. https://www.routledge.com/Statistical-and-Econometric-Methods-for-Transportation-Data-Analysis/Washington-Karlaftis-Mannering-Anastasopoulos/p/book/9780367199029
[P54] Európai Bizottság (2022): Digital Economy and Society Index (DESI) 2022. Európai Bizottság. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi (DESI 2022 rész; hozzáférés: 2026. november 7.)
[P55] Portulans Institute (2026): Network Readiness Index 2025. AI Governance in a Global Context: Policy and Regulatory Approaches. Szerk.: Escalona Reynoso, R., Lanvin, B. Portulans Institute. https://download.networkreadinessindex.org/reports/data/2025/nri-2025.pdf
[P56] Diamantopoulos, A., Winklhofer, H. M. (2001): Index Construction with Formative Indicators: An Alternative to Scale Development. Journal of Marketing Research, 38(2), 269-277. https://doi.org/10.1509/jmkr.38.2.269.18845

[P57] Rousseeuw, P. J. (1987): Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics, 20, 53-65. https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7
[P58] Bernus, P., Noran, O., Molina, A. (2015): Enterprise architecture: Twenty years of the GERAM framework. Annual Reviews in Control, 39, 83-93. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.03.008
[P59] International Organization for Standardization (ISO) (2006): ISO 19439:2006. Enterprise integration - Framework for enterprise modelling. 1. kiadás, ISO, Genf. https://www.iso.org/standard/33833.html
[P60] International Electrotechnical Commission (IEC) (2013): IEC 62264-1:2013. Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology. 2. kiadás, IEC, Genf. https://webstore.iec.ch/en/publication/6675
[P61] Saenz de Ugarte, B., Artiba, A., Pellerin, R. (2009): Manufacturing execution system - a literature review. Production Planning & Control, 20(6), 525-539. https://doi.org/10.1080/09537280902938613
[P62] International Electrotechnical Commission (IEC) (2016): IEC 62264-3:2016. Enterprise-control system integration - Part 3: Activity models of manufacturing operations management. 2. kiadás, IEC, Genf. https://webstore.iec.ch/en/publication/33511
[P63] Bertsimas, D., Kallus, N. (2020): From Predictive to Prescriptive Analytics. Management Science, 66(3), 1025-1044. https://doi.org/10.1287/mnsc.2018.3253
[P64] Emde, S., Boysen, N. (2012): Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. European Journal of Operational Research, 217(2), 287-299. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.013
[P65] Vieira, G. E., Herrmann, J. W., Lin, E. (2003): Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods. Journal of Scheduling, 6(1), 39-62. https://doi.org/10.1023/A:1022235519958
[P66] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. (2018): Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016-1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474
[P67] Hoekstra, S., Romme, J. (1992): Integral Logistic Structures: Developing Customer-oriented Goods Flow. https://search.worldcat.org/title/924931499
[P68] Olhager, J. (2010): The role of the customer order decoupling point in production and supply chain management. Computers in Industry, 61(9), 863-868. https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.07.011
[P69] Yang, B., Burns, N. (2003): Implications of postponement for the supply chain. International Journal of Production Research, 41(9), 2075-2090. https://doi.org/10.1080/0020754031000077284
[P70] Sargent, R. G. (2013): Verification and validation of simulation models. Journal of Simulation, 7(1), 12-24. https://doi.org/10.1057/jos.2012.20
[P71] Bertsimas, D., Sim, M. (2004): The Price of Robustness. Operations Research, 52(1), 35-53. https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065
[P72] Bilge, Ü., Ulusoy, G. (1995): A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in an FMS. Operations Research, 43(6), 1058-1070. https://doi.org/10.1287/opre.43.6.1058

[P73] Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M., Kauderer, M. (2015): Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. European Journal of Operational Research, 242(1), 107-120. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.065

[P74] Sethi, S., Sorger, G. (1991): A theory of rolling horizon decision making. Annals of Operations Research, 29(1), 387-415. https://doi.org/10.1007/BF02283607

[P75] Ouelhadj, D., Petrovic, S. (2009): A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. Journal of Scheduling, 12(4), 417-431. https://doi.org/10.1007/s10951-008-0090-8

[P76] Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S., Wismer, D. A. (1971): On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-1(3), 296-297. https://doi.org/10.1109/TSMC.1971.4308298

[P77] Mavrotas, G. (2009): Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. Applied Mathematics and Computation, 213(2), 455-465. https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037

[P78] Marler, R. T., Arora, J. S. (2004): Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and Multidisciplinary Optimization, 26(6), 369-395. https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6

[P79] Saaty, T. L. (1990): How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48(1), 9-26. https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I

[P80] Marler, R. T., Arora, J. S. (2010): The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. Structural and Multidisciplinary Optimization, 41(6), 853-862. https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7

[P81] Slotnick, S. A. (2011): Order acceptance and scheduling: A taxonomy and review. European Journal of Operational Research, 212(1), 1-11. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.042

[P82] Leung, J. Y.-T., Li, C.-L. (2008): Scheduling with processing set restrictions: A survey. International Journal of Production Economics, 116(2), 251-262. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.09.003

[P83] Sousa, J. P., Wolsey, L. A. (1992): A time indexed formulation of non-preemptive single machine scheduling problems. Mathematical Programming, 54, 353-367. https://doi.org/10.1007/BF01586059

[P84] Whybark, D. C., Williams, J. G. (1976): Material requirements planning under uncertainty. Decision Sciences, 7(4), 595-606. https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1976.tb00704.x

[P85] Buzacott, J. A., Shanthikumar, J. G. (1994): Safety stock versus safety time in MRP controlled production systems. Management Science, 40(12), 1678-1689. https://doi.org/10.1287/mnsc.40.12.1678

[P86] Kilic, H. S., Durmusoglu, M. B., Baskak, M. (2012): Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62(9-12), 1135-1146. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3875-4

[P87] Miller, C. E., Tucker, A. W., Zemlin, R. A. (1960): Integer programming formulation of traveling salesman problems. Journal of the ACM, 7(4), 326-329. https://doi.org/10.1145/321043.321046

[P88] Desrochers, M., Laporte, G. (1991): Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints. Operations Research Letters, 10(1), 27-36. https://doi.org/10.1016/0167-6377(91)90083-2
[P89] Taillard, É., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y. (1997): A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows. Transportation Science, 31(2), 170-186. https://doi.org/10.1287/trsc.31.2.170
[P90] Pochet, Y., Wolsey, L. A. (2006): Production Planning by Mixed Integer Programming. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, Springer, New York. https://doi.org/10.1007/0-387-33477-7
[P91] Williams, H. P. (2013): Model Building in Mathematical Programming. 5. kiadás, Wiley. ISBN 9781118443330. https://www.wiley.com/en-us/model-building-in-mathematical-programming-5th-edition-p-9781118443330
[P92] Camm, J. D., Raturi, A. S., Tsubakitani, S. (1990): Cutting big M down to size. Interfaces, 20(5), 61-66. https://doi.org/10.1287/inte.20.5.61
[P93] Land, A. H., Doig, A. G. (1960): An automatic method of solving discrete programming problems. Econometrica, 28(3), 497-520. https://doi.org/10.2307/1910129
[P94] Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. (1981): Complexity of vehicle routing and scheduling problems. Networks, 11(2), 221-227. https://doi.org/10.1002/net.3230110211
[P95] Ropke, S., Pisinger, D. (2006): An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. Transportation Science, 40(4), 455-472. https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0135
[P96] Koste, L. L., Malhotra, M. K., Sharma, S. (2004): Measuring dimensions of manufacturing flexibility. Journal of Operations Management, 22(2), 171-196. https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.01.001
[P97] Koste, L. L., Malhotra, M. K. (1999): A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. Journal of Operations Management, 18(1), 75-93. https://doi.org/10.1016/S0272-6963(99)00010-8
[P98] Jordan, W. C., Graves, S. C. (1995): Principles on the benefits of manufacturing process flexibility. Management Science, 41(4), 577-594. https://doi.org/10.1287/mnsc.41.4.577
[P99] Jack, E. P., Raturi, A. (2002): Sources of volume flexibility and their impact on performance. Journal of Operations Management, 20(5), 519-548. https://doi.org/10.1016/S0272-6963(01)00079-1
[P100] Leon, V. J., Wu, S. D., Storer, R. H. (1994): Robustness measures and robust scheduling for job shops. IIE Transactions, 26(5), 32-43. https://doi.org/10.1080/07408179408966626
[P101] Sabuncuoglu, I., Goren, S. (2009): Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 22(2), 138-157. https://doi.org/10.1080/09511920802209033

15. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A vizsgált kutatási témák éves publikációszámának alakulása 2012 és 2025 között . 11
2. ábra: A vizsgált kutatási témák közötti szakirodalmi kapcsolatok hőtérképe (2026.08.05.)12
3. ábra: A postponement és a logisztikai rugalmasság kutatási témájának relatív publikációs intenzitása a vizsgált kutatási területek vonatkozásában..... 15
4. ábra: A vállalati alkalmazkodás késedelmei és az alkalmazkodás értéke. (Forrás: [P1], 11. o., 1. ábra.)..... 18
5. ábra: Az acatech Ipar 4.0 érettségi index [P17]..... 19
6. ábra: A RAMI 4.0 referenciamodell felépítése [P23] 22
7. ábra: A kérdőíves kutatás keretrendszere..... 37
8. ábra: Vállalkozás mérete 38
9. ábra: A kérdőívben szereplő vállalatok régiós helyzete..... 38
10. ábra: A vállalatok tulajdonlása..... 38
11. ábra: A vállalatok hosszú távú stratégiai céljainak átalakítása..... 39
12. ábra: A logisztikai rugalmasság értékelése 40
13. ábra: A logisztikai rugalmasság értékelésére adott átlagos válaszok..... 41
14/a ábra: Akadályozó tényezők a logisztikai rugalmasság javítása szempontjából 41
14/b ábra: Válaszok száma..... 41
15/a ábra: Keresleti bizonytalanságra való reagálási lehetőségek..... 42
15/b ábra: Válaszok száma..... 42
16/a ábra: Keresleti bizonytalanságot okozó tényezők 42
16/b ábra: Válaszok száma..... 42
17. ábra: Az Ipar 4.0 technológiák logisztikai rugalmasságra gyakorolt hatásának értékelése nagy keresleti bizonytalanság mellett 43
18. ábra: Az Ipar 4.0 technológiák befolyásolásának értékelésére adott válaszok átlagos értéke 43
19/a ábra: Az Ipar 4.0 technológiák előnyei a keresleti bizonytalanság kezelésére vonatkozóan 44
19/b ábra: Válaszok száma..... 44
20. ábra: A halasztási stratégia alkalmazása a vállalatoknál..... 48
21. ábra: A halasztásos stratégia alkalmazása a vállalatok mérete szempontjából 48
22/a ábra: A halasztási stratégia felhasználási területei 49
22/b ábra: Válaszok száma..... 49
23/a ábra: A halasztási stratégia felhasználási céljai..... 49
23/b ábra: Válaszok száma..... 49
24. ábra: A halasztási stratégia értékelése az alkalmazási szempontok szerint 50
25. ábra: A halasztási stratégia alkalmazási szempontjaira adott átlagos értékek..... 50
26. ábra: A kutatásban részt vevő vállalatok digitális eszközei, képességei..... 52
27. ábra: A kutatásban résztvevő vállalatok digitális eszközei, képességei az Ipar 4.0-hoz kapcsolódóan..... 52
28. ábra: A vállalatok digitális stratégiája és a halasztásos stratégia alkalmazása közötti összefüggés vizsgálata..... 53
29. ábra: A digitalizációs stratégia megléte a kérdőíves kutatásban részt vevő vállalatoknál . 61
30. ábra: A láthatóság és átláthatóság tételeinek értékelése (15. kérdés, a digitális ikerből származó adatok elemzésére vonatkozó tételnél n = 26, a többinél n = 27) 62

31. ábra: Az előrejelző képesség és az alkalmazkodás tételeinek értékelése (16. kérdés, a vállalati kultúrára vonatkozó tételnél n = 26, a többinél n = 27) 63
32. ábra: A vállalatok hierarchikus klaszterelemzésének dendrogramja (Ward-eljárás, nyolc standardizált DFI-komponens) 66
33. ábra: A digitalizált postponement logisztikai rendszer általános működési modellje 75

16. TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: A postponement és a vizsgált kutatási témák közötti relatív publikációs intenzitás (RPI) 14
2. táblázat: A logisztikai rugalmasság és a vizsgált kutatási témák közötti relatív publikációs intenzitás (RPI) 14
3. táblázat: A logisztikai rugalmasság dimenzióinak működési értelmezése (Forrás: saját szerkesztés az értekezés vizsgálati dimenziói és a fogalmi áttekintés [P24] alapján) 23
4. táblázat: A logisztikai rugalmasság SWOT-analízise 45
5. táblázat: A Postponement stratégia SWOT-analízise 51
6. táblázat: A khí-négyzet próba eredményeinek összefoglalása 54
7. táblázat: A Digitális Fejlettségi Index komponensei, pontozása és súlya 58
8. táblázat: A DFI-komponensek és az index leíró statisztikái (n = 27) 61
9. táblázat: A válaszok megoszlása Digitális Fejlettségi Szint szerint 63
10. táblázat: A DFI-komponensek Spearman-féle rangkorrelációs mátrixa (n = 27) 64
11. táblázat: Az érzékenységvizsgálat eredményei 64
12. táblázat: A DFI a vállalatméret, a tulajdonosi háttér és a stratégiai stádium szerint 65
13. táblázat: A négy vállalati profil jellemzői (klaszterátlagok) 67
14. táblázat: A Digitális Fejlettségi Szint és a halasztási stratégia alkalmazásának kereszttáblája (n = 27) 68
15. táblázat: A DFI és az önértékelt logisztikai rugalmasság kapcsolatának eredményei (n = 27). Forrás: saját számítás a kérdőíves adatfelvétel alapján 69
16. táblázat: Az 1. réteg kezelt információi: forrás, gazdarendszer és felhasználó 77
17. táblázat: A 2. réteg folyamatszakaszainak összefoglaló jellemzése 79
18. táblázat: Az erőforrások és működési korlátok tipizálása és megjelenésük a 9.2. alfejezet modelljében 82
19. táblázat: A rendszer külső információáramai 83
20. táblázat: A digitális funkciók kapcsolódása a folyamatszakaszokhoz 87