Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Gyártástudományi és -technológiai Tanszék

Termék életciklus végi szétszerelési eljárás többcélú optimalizáló szoftverkeretrendszer fejlesztése

TDK dolgozat

Készítette:

Barcza Bende

Konzulens:

Dr. Szántó Mátyás
Magyar Gergely

2024

Tartalomjegyzék

Kivonat i

Abstract ii

1. Bevezetés 1

2. Irodalomkutatás 3
2.1. A lineáris gazdaság . . . 3
2.1.1. Áttérés lineárisról körkörös gazdaságra . . . 4
2.2. A körkörös gazdaság . . . 4
2.2.1. 9R bemutatása . . . 6
2.2.2. Újrahasznosítás . . . 6
2.3. Terméktervezés és a körkörös gazdaság . . . 7
2.3.1. Szétszerelési szekvenciák . . . 8
2.3.2. Orientált tervezési eljárások . . . 11
2.3.3. Szétszerelési szekvencia optimalizálása . . . 11
2.3.4. PAC gráfok . . . 13
2.4. Adatra optimalizálás és mesterséges intelligencia a körkörösségben . . . 13
2.4.1. Adatra optimalizálás megjelenése a körkörösségben . . . 14
2.4.2. Mesterséges intelligencia és a fenntarthatóság . . . 14
2.4.3. Nagy nyelvi modellek . . . 15
2.5. Kutatásom újdonsága . . . 16

3. Az algoritmus fejlesztése 17
3.1. Üzleti célok megértése . . . 18
3.1.1. Az általam vizsgált termék részei . . . 18
3.1.2. Kötési-oldási technológiák . . . 19
3.1.3. Projekt tervezése . . . 19
3.2. Adatok megértése . . . 20
3.2.1. Alkatrészjegyzék digitális formája . . . 20
3.2.2. Szerelési technológiák feltárása . . . 21
3.2.3. Szétszerelési technológiák kapcsolása összeszerelési technológiákhoz . . . 21
3.2.4. Szétszerelési variánsok képzése . . . 21
3.2.5. Adatok összefoglalása . . . 23
3.3. Adatok előkészítése . . . 23
3.3.1. Szülő-gyermek kapcsolatok a darabjegyzékben . . . 23
3.3.2. Adatfolyam felépítése . . . 24
3.3.3. össze- és szétszerelés kapcsolata . . . 25
3.4. Modellezés . . . 26
3.4.1. Modell választása anyagcsoportosításhoz . . . 26
3.4.1.1. Teljes Nyelvi modell tanítása . . . 27

3.4.1.2. Nyelvi modell részeinek fagyasztása . . . 27
3.4.1.3. Tanítások karbonlábnyoma . . . 28
3.4.2. PAC gráfok szétszerelési variánsokkal . . . 29
3.4.3. Optimalizációs algoritmus . . . 29
3.4.3.1. Kényszerek a szétszerelési típusokban . . . 30
3.4.3.2. Összes variáns képzése . . . 32

4. Eredmények, kiértékelés **35**
4.1. LLM kiértékelése . . . 35
4.1.1. LLM tanítás, pontosság . . . 35
4.1.2. AUROC elemzések . . . 37
4.1.2.1. Többosztályos ROC görbe . . . 37
4.2. Optimalizáció eredményei . . . 38
4.2.1. Algoritmusok időkomplexitásának összehasonlítása . . . 39
4.2.2. Optimális szétszerelési sorrend . . . 40
4.3. Megoldási tér . . . 40
4.3.1. Teljes megoldási tér . . . 41
4.3.1.1. Összes megoldás és optimalizált megoldás összehasonlítása . . . 42
4.3.2. Megoldási tér szűkítése . . . 43
4.4. Alkalmazhatóságorientált eredmények . . . 44

5. Összefoglalás **46**

Köszönetnyilvánítás **48**

Irodalomjegyzék **49**

Kivonat

A mobilitási szektorban a körkörös gazdaság elengedhetetlen, hiszen az egyre korlátozottabb nyersanyagforrások és az életciklus utáni kezelés kihívásai komoly problémákat vetnek fel. Az elmúlt években jelentős változások történtek a terméktervezésben és a fogyasztói hozzáállásban [1]. Bár a körforgáshoz vezető megoldások bevezetése még mindig nehézségnek számít, a már megvalósított innovációk jó elöljáró példaként szolgálnak, a számos akadémiai kutatás pedig újabb betörési lehetőséget biztosít a fenntartható piac irányába [2].

Kutatásom célja egy adatalapú szoftver-keretrendszer kidolgozása, amely egy termékportfólió szétszerelhetőségét vizsgálja. Ezáltal lehetőséget ad a termékben rejlő életciklus utáni érték azonosítására és megbecsüli az újrahasznosításból származó profitot. Az optimalizálást „szülő-eljárás-gyermekek" fagráfok elemzésével végzem. A fejlesztett algoritmus alkalmas az egyes szereltségi szinteken a hasznosítható érték meghatározására. Az alkomponensek értékét, azokat anyagcsoportokba rendezve, tömegárral határozom meg. Az anyagcsoportokba történő besorolást az alkatrészjegyzékben szereplő alkatrésznevek alapján, az általam betanított nagy nyelvi modell segítségével történik. Mivel csak az összeszerelési művelet állt rendelkezésre, a kötési technológia meghatározása további kihívást jelentett.

A kötési technológiákhoz tartozó lehetséges szétszerelési módszer, majd az alkomponensek tulajdonságai alapján meghatározhatóvá vált a potenciálisan elérhető profit. Ezen információ felhasználásával az egy termékhez tartozó „szülő-eljárás-gyermekek" gráfot hozza létre az általam fejlesztett algoritmus. A szétszerelési munkát és újrahasznosítási értéket egy munka-profit (megtérülés/ellenérték) diagramon elhelyezve, az egyes szétszerelési kombinációk megtérülése meghatározható. Az ismertetett módszert a profit maximalizálása mellett alkalmazható ökológiai lábnyom minimalizálásra is. A kutatásban bemutatott metódus így egy moduláris szoftverkeretrendszert biztosít azon cégek számára, akik körkörösség szempontjából vizsgálnák termékeiket.

Abstract

The circular economy in the mobility sector is essential, as increasingly limited raw material resources and the challenges of product end-of-life management raise serious concerns. In the recent years, there have been significant changes in product design and consumer behaviour [1]. Although the implementation of circular solutions is still a challenge, the innovations that have already been implemented are stand as good examples and the numerous academic research provide new ground to break into the sustainable market [2].

The main goal of my research is to develop a data-driven software framework to investigate the disassemblability of a product portfolio. This will allow to identify the end-of-life value of the product and estimate the profit that can be gained from recycling. The optimisation is performed by analysing "Parent-Action-Children" tree graphs. The developed algorithm can determine the recoverable value at each assembly level. I estimate the value of the subcomponent, by grouping them into material groups, and define a price by mass for each group. The material grouping is based on the component names in the bill-of-materials, for this purpose I trained a Large-Language-Model to classify each name into one of the material groups. Since only the assembly process was available in my dataset, the definition of the joining technology was an additional challenge.

Based on the possible disassembly method for the joining technologies and the properties of sub-components, the potential profits can be determined on each level. Using this information, the "Parent-Action-Children" graph for the given product can be generated by the algorithm I developed. By plotting the disassembly effort and recycling value on an effort-profit diagram, the payback for each disassembly combination can be determined. In addition to maximizing profit, the presented method can also be applied to minimize ecological footprint. The methodology presented in this research thus provides a modular software framework for companies that want to analyse their products from a circularity perspective.

1. fejezet

Bevezetés

Napjainkra egyértelművé vált, hogy a környezetszennyezésből adódó globális felmelegedés számos káros hatást gyakorol természetünkre, beleértve az élővilág pusztulását, az ökoszisztémák megzavarását és az extrém időjárási események gyakoribbá válását[3]. Az éghajlatváltozás kihívásainak felismerését követően számos kezdeményezés indult annak érdekében, hogy mérsékeljük vagy megakadályozzuk ezeket a folyamatokat, sőt bizonyos esetekben megpróbáljuk visszafordítani őket. Ezek a lépések különösen a közlekedési szektorban váltak fontossá, mivel ez az egyik legnagyobb szén-dioxid-kibocsátó, amely közvetlen hatással van a globális felmelegedés ütemére. A teljes CO_2e (szén-dioxid egyenértékűk karbonlábnyom) kibocsátás körülbelül 14%-át teszi ki a közlekedési szektor[4], így fontos annak vizsgálata, hogy milyen módszerekkel lehetséges csökkenteni ezt a környezetszennyezést.

A jelenlegi gazdasági gondolkodásban, különösen az autóiparban, a lineáris gazdasági modell dominál [5]. Ez a modell a nyersanyagok kitermelésére, termékek gyártására, fogyasztására, majd hulladékként való eldobására épül, ami súlyosan megterheli a környezetet. Azonban az autóiparban megjelenő technológiai változások – például az elektromos járművek terjedése – elősegíthetik a körkörös gazdasági modellre való áttérést[6], amelyben a termékek újrahasznosítása és az erőforrások újrafelhasználása kerül előtérbe. Ez a modell csökkenthetné a nyersanyagok iránti keresletet, csökkentené a hulladéktermelést, és jelentős előrelépést jelentene a fenntartható gazdaság megvalósításában. Az autóipar tehát nemcsak kulcsszereplő a környezeti változások kezelésében, hanem potenciálisan a gazdasági gondolkodás mélyreható átalakításának katalizátora is lehet.

Az iparosodás korszakában a tömegtermelés exponenciális növekedése következett be, ami egyidejűleg vezetett a hulladéktermelés növekedéséhez. A háborús időszakban először vált nyilvánvalóvá az alapanyagok hiánya és az ehhez kapcsolódó kihívások. Az országoknak új helyzettel kellett szembenézniük, mivel a nagy volumenű termelés jelentős nyersanyagigényt generált. Ahogy a nemzetközi konfliktusok fokozódtak, az Egyesült Királyság új stratégiákat dolgozott ki a nyersanyagellátás biztosítására. A stratégiai fókusz a hiánycikkek fenntartására és óvatos felhasználására irányult. A jogi szervezetek hatáskörét bővítették, hogy felügyeljék az árképzést, a termelési volumen szabályozását, valamint bevezettek hatósági korlátozásokat az alapanyagokra. Ez a megközelítés lehetővé tette a nyersanyagok hatékonyabb felhasználását és a termelés fenntarthatóságának növelését már a háborús időszakban is.[1]

A hulladékgazdálkodás infrastruktúrája Nyugat-Európában vette kezdetét, ahol a kezdeti erőfeszítések hullámszerűen terjedtek el, és alapvetően formálták át a modern hulladékkezelési gyakorlatokat. A hulladékgyűjtés a hetvenes évekig helyi jellegű volt, a hulladékot a települések közelében lévő lerakóhelyekre szállították. A hulladékgazdálkodás fejlődése ezt követően 3 további hullámra osztható [1]. A második hullámban jelent meg a hulladékszétválogatás fogalma. Bár eleinte csak a papírt, üveget és építési hulladékot válogattak szét, napjainkra ez kiterjedt számos már anyagcsoportra is. Dolgozatomban kulcsfontosságú szerepet játszanak az

anyagcsoportok, mivel ezek alapján határozom meg a visszanyerhető értéket. A harmadik hullám főfókusza a hulladékhierarchia kialakítása volt. Ennek az új csoportosításnak a fókuszában az egyes anyagok környezetre gyakorolt káros hatása állt. Napjainkban a hierarchia olyan szempontja is megjelent, melyben figyelembe veszik az adott anyag területre vetített rendelkezésre állóságát[7]. Így Európában egyre nagyobb figyelmet fordítanak a ritkaföldfémekre. Az autóipar számára fontos ezeknek az anyagoknak a jelenléte, hiszen a modern gyártás növekedő mértékben veszi igénybe a hierarchia tetején elhelyezkedő ritkaföldfémeket [6, 8]. A negyedik hullám napjainkban is zajlik, középpontjában pedig a körkörös gazdaság áll.

A dolgozatomban egy olyan módszert mutatok be, amely lehetővé teszi például az autóipari vállalatok számára, hogy megvizsgálják termékportfóliójuk fenntarthatóságát, különös tekintettel a körkörös gazdaságra való átállásra. A kutatás alapját a Bosch motorvezérlő elektronikai gyárai által szolgáltatott adatok képezik, amelyek elemzését elvégeztem, hogy feltárjam, miként lehet a releváns szakirodalomban található módszereket hatékonyan beépíteni a mindennapi ipari gyakorlatba. A célom, hogy egy olyan modulárisan alkalmazható szoftverkeretrendszer alapjait dolgozzam ki, amely akár a Bosch számára is integrálható a terméktervezési folyamatokba, illetve a meglévő termékportfólió fenntarthatósági értékelésébe.

A keretrendszer az adatalapú optimalizáció elvén működik, amelyhez az adatokat különböző gyári környezetben használt adatbázisokból és a szakértők által összeállított táblázatokból gyűjtöttem össze. A kutatás során kiemelt figyelmet fordítottam a termékek kötési technológiáinak azonosítására és azok csoportosítására, amelyek a visszanyerhető értékek egyik legfontosabb elemét képezik. A kutatás másik főpillére az anyagok csoportosítása, melyhez egy mesterséges intelligenciával támogatott megoldást mutatok be, ezen belül is a nagy nyelvi modellek egyik lehetséges alkalmazását. Végül az így összegyűjtött adatokon optimalizációt végzek, ahol kimenetként a mind a visszanyerhető értéket mind a karbonlábnyomot meghatározom. Az optimalizációs folyamat gráfelméleti megközelítésre épül, amelyben különös hangsúlyt fektettem a folyamatot korlátozó kényszerek azonosítására és figyelembevételére.

A dolgozat felépítését tekintve, kezdésként bemutatom, hogyan működik a jelen levő lineáris gazdaság, és hogyan lehetne ezt átvezetni a körkörös gazdaságba. A 2 fejezetben bemutatott és általam elemzett irodalmak kitérnek mind a témám napjainkra vetíthető relevanciájára, mind az eddig alklamazott megoldásokra melyekből ihletett meríthettem. A 3 fejezetben az *adatbányászat iparágakon átívelő szabványos folyamata* (angolul: Cross-Industry Standard Process for Data Mining, röviden: CRISP-DM) modell alapján vezetem be a megtervezett szoftverkeretrendszer és annak felépítését, működését. A 4 fejezetben bemutatom kutatásom eredményeit és kitérek rá, milyen módon segítik azok a termékek elemzését egy céges környezetben. Végül az 5 fejezetben meghatározom az általam fejlesztett rendszer alkalmazási lehetőségeit, előnyeit és hátrányait az irodalmi példákhoz képest és meghatározom a korlátait és a továbbfejlesztési lehetőségeket.

2. fejezet

Irodalomkutatás

A témához kapcsolódó szakirodalom felkutatása során számos gyakorlatban is alkalmazott megoldási lehetőségekkel találkoztam. A probléma megközelítése ezek között alapvetően hasonló volt, de részleteiben eltértek, illetve az adott alkalmazásra specifikusak voltak, így általános keretrendszer - mellyel ezen megolások konkrét termékekre bevezethetők lehetnének - még nincs felállítva. A dolgozatom következő fejezetében bemutatom a körkörös gazdaság tervezéséhez kapcsolódó megoldásokat, miközben ismertetem annak fogalmát és jelenkori jelentőségét. A témát szélesebb perspektívából közelítem meg: a logisztikai és összekötött hálózatokra vonatkozó megoldásoktól indulok, majd eljutok a konkrét termékek szétszerelésére optimalizált megközelítésekig, amelyeket az egyes cikkek tárgyalnak.

2.1. A lineáris gazdaság

A lineáris gazdaság az "elkészítés-felhasználás-eldobás" elven működik. Az így legyártott termékek egy megadott életutat követően hulladék formában végzik, vagyis azok értéktelennek vannak tekintve. Igaz, gazdaságilag a fogyasztói társadalomnak ez az előnyét szolgálja, hiszen így a vevő hamarabb fog újra vásárolni, és így a gyártó és az eladó is jól jár, ezzel képes növelni a bevételeit. Azonban hamar fény derült arra, hogy az ilyen féktelen gyártás és halmozás milyen negatív hatással van a környezetünkre és erőforrásainkra [9]. A nyersanyagok történelmünk során mindig is fontos szerepet játszottak akár döntéshozatali, akár gazdasági szempontból. Ha helyben rendelkezésre állt a nyersanyag, akkor előnyösebb megoldást jelentett annak kibányászása és feldolgozása, azonban az EU-nak sok tagálláma hiányol számos kritikus high-tech iparágakban alkalmazott ritkaföldfémeket, mely importfüggőséget okoz. Ennek következménye a lassabb fejlődés az adott tagállamokban, mivel eredendően egy gazdasági hátrányból indulnak. Egyes elemek, mint a cink, a réz vagy az arany könnyebben elérhető, mivel régóta rendelkezésre állnak, és a mindennapi kereskedelem részét képezik a piacokon. Az újabban megjelent és egyre nagyobb fontossággal rendelkező ritkaföldfémek piaca kevésbé nyitott, általában üzleti felek egymás közötti cseréjének tárgyát képezik, így árazásuk és rendelkezésre állásuk nehezebben számítható ki [1].

Az autóipar az egyik legnagyobb mértékben függ a kritikus anyagoktól, különösen az elektromos járművek esetében, amelyek jelentős mennyiségben tartalmazzák ezek egy csoportját, a ritkaföldfémeket [7]. Az elektromos autók akkumulátorai akár 7%-ban is tartalmazhatnak ritkaföldfémeket, amelyek nélkülözhetetlenek az akkumulátorok teljesítményéhez és hosszú élettartamához [6]. Mivel a ritkaföldfémek kitermelése és feldolgozása környezeti terhekkel jár, ezek visszanyerése az autók életciklusa végén nem csupán ökológiai szempontból lenne kritikus, hanem jelentős gazdasági hasznot is hozhatna a gyártóknak. Az újrahasznosítás révén csökkenthető a ritkaföldfémek iránti külső piacoktól való függőség, ami stabilabb alapanyagellátást eredményezhet, miközben a gyártási költségek is mérséklődnek. Emellett, az egyre szi-

gorodó környezetvédelmi szabályozásoknak is megfelelhetnek a cégek, ha előtérbe helyezik az anyagok körforgásban tartását, ami hosszú távon fenntarthatóbb üzleti modellhez vezethet. A ritkaföldfémek értékének megőrzése és újrahasznosítása tehát stratégiai fontosságú mind a környezet, mind a gazdaság szempontjából.

2.1.1. Áttérés lineárisról körkörös gazdaságra

Peck és tsai. [1] oktatási anyagában leírtak alapján, a lineáris gazdaságból a körkörös gazdaságba való átmenet komplex folyamat, amely a fogyasztói és termelői szokások radikális megváltozását igényli. A hagyományos nézőpont, miszerint termékeket hozunk létre és cserélünk le, helyett a termékek tervezésekor figyelembe kell vennünk azok tervezett élettartamát. Az életciklusra tervezés első lépése ennek a perspektívaváltásnak az átgondolása és integrálása a tervezési folyamatba. Ez segít elkerülni a termék teljes anyagszintű lebontását, és lehetővé teszi annak részleges lebontását és újrahasznosítását, mivel e modell szerint a termék értéke a funkcionalitásában és komplexitásában rejlik. Egy ilyen váltáshoz rendszerszintű átállásra van szükség mind a tervezők, mind a fogyasztók részéről. Egy létező jó megközelítés, hogy termékeket szolgáltatásként nyújtunk, így a szolgáltató felelős a termék életciklusáért, míg a felhasználó általában előfizetésért cserébe jobb minőségű terméket kaphat. A termékek használatáról alkotott képünknek azt kell tükröznie, hogy maximalizáljuk annak értékét, minimalizáljuk a romlását, hogy a korábbi "elkészítés-felhasználás-eldobás" paradigmát körkörösre váltsuk. A veszteségek nem szüntethetőek meg teljes mértékben, azonban azok minimalizálása minden szinten lehetséges. Az újrahasznosítással csökkenthetjük ezt a veszteséget, akár az anyagot a felhasználási kör elejére helyezve, vagy azt egy új termékbe beépítve, máris újra értéket teremtettünk. Az így létrehozott kapcsolat az egyes termékciklusok között azt mutatja, hogy nem konkrét körökről van szó, hanem sokkal inkább dinamikusan összekapcsolt termékekről. Ez jól demonstrálja, hogy a körkörös gazdaság milyen komplex kapcsolatok létrehozását igényli az egyes szektorok és ellátási láncok között [1].

A "Circular Economy Action Plan and regulation amendments" dokumentum a cirkuláris gazdasági cselekvési tervről és a szabályozási módosításokról szól. A terv célja a fenntarthatóság előmozdítása azáltal, hogy elősegíti az erőforrások hatékonyabb felhasználását, és csökkenti a hulladékot. A dokumentum részletezi a meglévő szabályozások módosításait, amelyek a cirkuláris gazdaság elveit támogatják. A terv azonosítja a fenntarthatósági célokat, amelyeket a szabályozási változtatásokkal kívánnak elérni. A dokumentum ismerteti a cselekvési terv végrehajtásához szükséges lépéseket. Ezek a pontok összefoglalják a dokumentum fő témáit és céljait [10].

2.2. A körkörös gazdaság

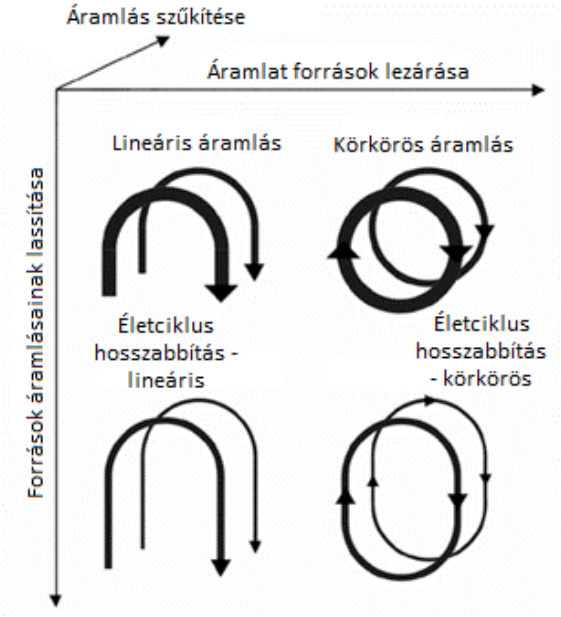
A körkörös gazdaság fogalma és annak kerete Stahel [11] cikkében kerül kifejtésre. Összefoglalva és lefordítva: a „körkörös gazdaság" az élettartamuk végére érő árucikkeket mások számára erőforrásokká alakítaná, bezárva az ipari ökoszisztémák körforgását, és minimalizálva a hulladék mennyiségét. Ez megváltoztatná a gazdasági logikát, mivel a termelést a kellő hatékonysággal helyettesítené: újrahasználjuk, amit lehet, újrahasznosítjuk, ami nem használható újra, megjavítjuk, ami elromlott, újragyártjuk, ami nem javítható.

A körkörös termékgyártást elősegítő elv a termékek felhasználási hurkok által való elemzése. Ennek segítségével a termék életútját és az azt felépítő anyagokat egy felhasználási hurokként értelmezzük és vizualizáljuk. Ehhez nyújt segítséget a 2.1 ábra, mely a következő 3 fő irányelvet jelképezi:

- Hurkok szűkítése: a termék gyártásához használt anyagok csökkentése,
- Hurkok lassítása: a termék élettartamának növelése,

- Hurkok bezárása: a termék 4R-esítése, vagyis felhasznált anyagok értékének megtartása.

Lineáris áramlás esetén nem tekinthetjük lezártnak a hurkot, vagyis a felhasznált anyag kikerül a körkörösségből, és elveszti az értékét. Az általam fejlesztett keretrendszer a hurkok lezárására fókuszál, vagyis arra, hogy megmutassa, milyen értéket tudunk visszanyerni az elemzett termékekből elsősorban anyagszinten. Továbbfejlesztési lehetőségként a későbbiekben kitérek rá, hogy ez hogyan terjeszthető ki újrahasználási szinten.



2.1. ábra. Körkörös gazdaságban értelmezett anyaghurkok [1]

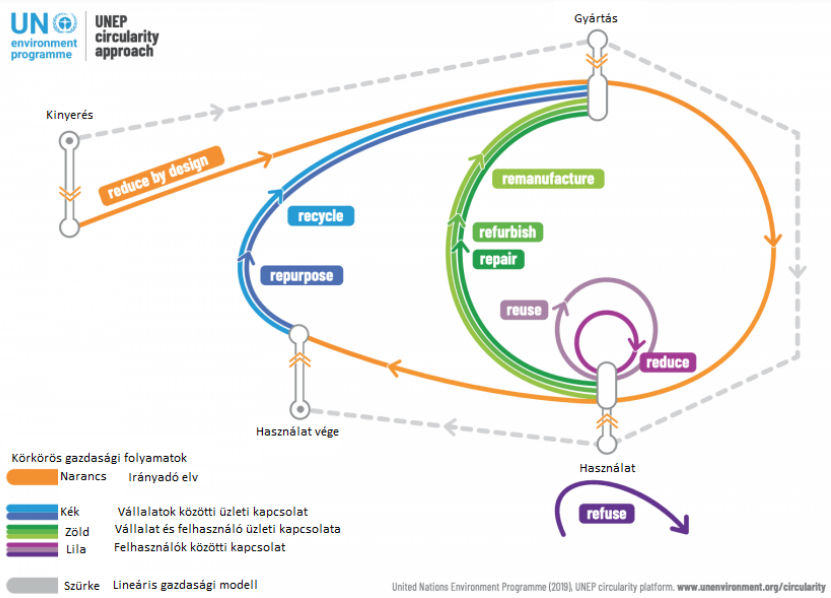
Az LCA (*life cycle assessment - életciklus analízis*) folyamat egy ISO által bejegyzett folyamat. Az LCA értékelés első lépése a célkeret meghatározása. A cél tartalmazza a felhasználandó eszközöket és a kívánt célközönséget, a keret pedig megadja a vizsgálni kívánt eszközöket (legyen az fizikai termék vagy szolgáltatás), ez lesz a *funkcionális egység* és a *rendszer határai*, melyen belül kiértékeljük a terméket. Bár konkrét LCA mérésekre nem volt szükség a kutatásomhoz, azonban a keretek meghatározása számomra is fontos kérdés volt. Egy termék szétszerelése egyes esetekben sztochasztikus feladatnak tekintendő. Például egy régen beszerelt csavar éveken át tartó használatot követően nem minden esetben lesz ugyanolyan minőségű, amikor oldására kerülne a sor. Irodalomkutatásom során találtam arra vonatkozó számításokat és megoldásokat, ahol ezen volt a fókusz. Gao és tsai. [12] cikkében 6 féle kritérium alapján sorolja be a vizsgálandó jellemzőket. Bár a bemutatott sztochasztikus megoldások jobban tükrözik a valóságot, azonban számomra fontosabb volt, hogy egy egzakt értéket tudjak meghatározni egy-egy szétszerelésre. Így az elveket és logikát felhasználva véletlenszerűséget nem vettem figyelembe, hanem minden kötési technológiához különböző szétszerelési variánst képeztem, ezzel megtartva a lehetőségét az adott szétszerelési eljárás nem valósítható meg.

Funkcionális egység alapján határozzuk meg, hogy milyen minőségű és mennyiségű értéket teremt az általunk vizsgált eszköz, vagyis itt számszerűsítjük termékünk funkcionalitását. A megfelelő funkcionális egység megválasztásakor a több tulajdonság figyelembevétele is fontos, beleértve annak élettartamát is. Például, ha vizsgálunk kettő turmixgépet, akkor nem elég csak a teljesítményüket összehasonlítani. Fontos venni azoknak élettartamát, tisztíthatóságát és a tervezett használati órákat, hiszen ezek alapján eltérőt választunk otthoni használatra, mint egy éttermi konyha számára. Tehát a választott egységünk meg kell határozza, hogy mi lesz a végső adott értéke a termékünknek. Szétszerelés során fontos meghatározni, hogy az adott alegységnek (pl.: PCB) van-e további felhasználási relevanciája, képes lenne-e egy másik termékben

funkcionális egységet betölteni. Ezek az alegységek tömegáron túl további értékkel rendelkeznek, amelyet az optimalizáció során figyelembe vehetünk [1].

2.2.1. 9R bemutatása

A körkörös gazdasági stratégiák központi eleme a 9R modell, amely a legfontosabb megoldásokat foglalja magába a környezeti degradáció és károsodás megelőzésére. A 2.2 ábrán szereplő minden egyes hurkot olyan lehetőségként értelmezhetjük, amely a használt alkatrészek újrahasznosításával és újraértékesítésével hozzájárul a körkörös anyagáramlás fenntartásához. Az ábra a 9R elv elemeit tartalmazza, melyek: *reduce by design* (dizájn általi csökkentés), *reuse* (újrahasználás), *reduce* (csökkentés), *refuse* (lemond), *recycle* (újrahasznosítás), *reporpuse* (újboli felhasználás), *repair* (javítás), *refurbish* (felújítás), *remanufacture* (újragyártás). Kutatásom középpontjában az életciklus vége és a gyártás közötti kapcsolódási pontok, különösen az újrahasznosítás folyamata állt. Az üzlettől üzletnek (B2B) megközelítés révén a gyártók képesek saját termékeiket újra értékké alakítani, ezzel elősegítve a körforgásos gazdasági modell érvényesülését portfóliójukban. Mivel a termékhurok cégen belül is zárható, hatékony megvalósítása közvetlen bevételi forrássá válhat. Az újrahasznosítással így felszabadíthatjuk a korábban értéktelennek vagy hulladéknak tekintett alkatrészekben rejlő értékes lehetőségeket.



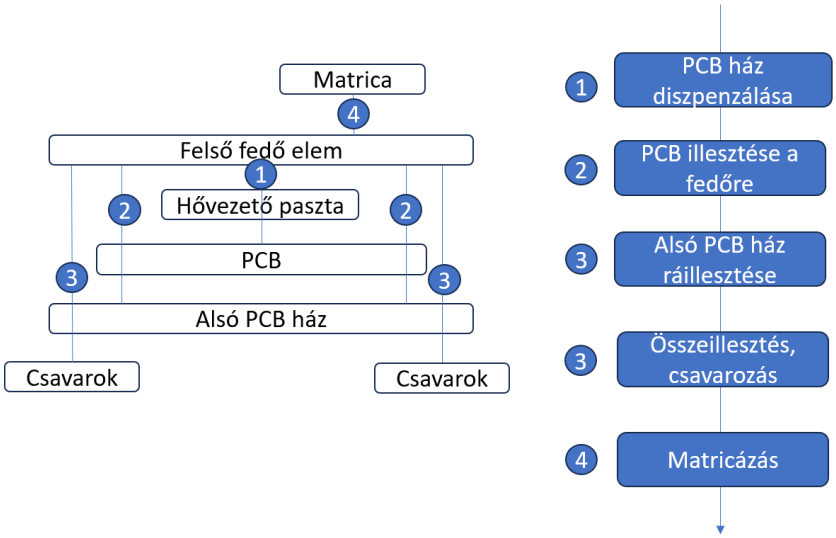
2.2. ábra. 9R stratégia folyamattal való ábrázolása [13]

2.2.2. Újrahasznosítás

Az autóipar nagy mennyiségű gyártásának köszönhetően előnyben vannak részesítve azok a termékarchitektúrák, melyek könnyen gyárthatóak hasonló vagy akár ugyanazon a gyártósoron. Ennek előnye, hogy a termékek közel hasonló felépítésűek lesznek. Ezt a felépítési architektúrát nevezzük szendvics-archetípusnak, sematikus rajza a 2.3 ábrán látható. Általános felépítése pedig:

- Doboz (mint fő befoglaló egység),
- Nyomtatott áramkör a vezérlési logikával,
- Szigetelés/rezgéscsillapítás, amely körbefogja a PCB-t,

- Csatlakozó, amin keresztül a vezérlő kommunikál,
- Fedő, amely zárja a rendszert és összefogja a fentieket.



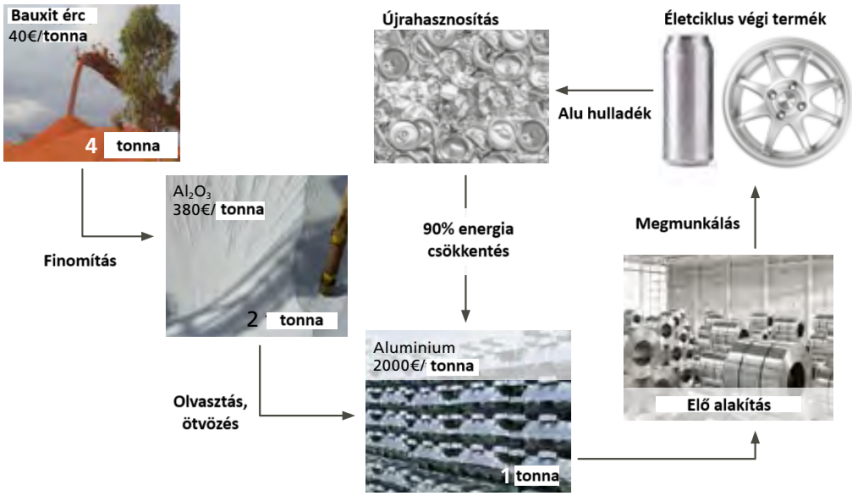
2.3. ábra. Szendvics architektúra sematikus rajza

Az így megtervezett vezérlők hasonló kötési technológiákkal vannak ellátva. Ezt a tulajdonságot ki tudjuk használni a szétszerelésnél is, hiszen ennek képére egységesíthetőek ezek az úgynevezett dizájnelemek. Dizájnelem alatt azt a kötési technológiát értjük, amivel az adott alkatrészek összeilleszkednek. Például egy dizájnelemnek nevezzük a csavarozást, összeépülő alkatrészekbe pedig belevesszük a két összecsavart elemen túl a csavarokat is. A szétszerelésnek fontos lépése, hogy az adott dizájnelemet visszafejtsük, tehát esetünkben a csavarokat kicsavarjuk.

Az újrahasznosítás általában egy, két cég között létrejövő fenntarthatósági eljárás, ahol általában egy bontóműhely újra felhasználható nyersanyagnak adja el az általa kinyert anyagokat, például nyersanyagáron. Ezt pedig egy gyár felvásárolja előnyösebb áron, mintha megvette volna a kibányászott és feldolgozott nyersanyagot. A 2.4 ábra jó példát mutat arra, hogy az alumínium esetében milyen arányokban lehetséges az anyag újrahasznosítása. Az eredeti származását tekintve, először bauxitként kerül kibányászásra, amely keresztül megy egy finomításon. A következő lépésben olvasztják és ötvözik az anyagot. A végső két lépésben előformázáson majd formázáson esik keresztül, hogy elnyerje a felhasználási formáját. Az újrahasznosítási ciklus ezután lesz figyelembevéve, amikor az adott termék már nem tudja betölteni eredeti célját, így életciklusának a végéhez ért. A 2.4 ábra mutatja, hogy alumínium esetében, ha újrahasznosított anyagokból dolgozunk, akkor a nyersanyag elkészítéséhez szükséges energia akár 90%-át meg tudjuk spórolni a hurok lezárásával.

2.3. Terméktervezés és a körkörös gazdaság

Egy adott termék előállításának folyamata nagyon összetett, amely az alapanyagok beszerzésétől kezdve az összeszerelésen át a vásárlóhoz történő eljuttatásig számos kézen és raktáron megy keresztül. Az IoT-technológiák és a nagy adatmennyiség elemzésével a beszerzési döntések hatékonyabbá válhatnak, különösen az újrahasznosított anyagok felhasználása terén. Az ilyen technológiák lehetővé teszik az anyagok regeneratív használatát, ami jelentős költségcsökkentést eredményezhet a beszerzésben és az újrahasznosításban is[14].



2.4. ábra. Alumínium újrahasznosíthatósága [1]

A környezeti adatok, például az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátásának nyomon követése és megosztása kulcsfontosságú az optimális döntések meghozatalában. A termékek életciklusuk végén történő visszabontása nemcsak az újrahasznosítást segíti, hanem a karbonkibocsátás csökkentéséhez is hozzájárul. A beszerzési hely kiválasztása szintén fontos tényező, hiszen az alacsonyabb ár gyakran nagyobb karbonlábnyommal jár, míg a fejlettebb régiókban végzett összeszerelés környezetbarátabb lehet[14]. Az általam bemutatott megoldás alacsonyabb szinten hivatott vizsgálni a problémát. Nem veszem figyelembe az alapanyagok eljuttatásának nehézségeit, illetve az abból adódó költségeket.

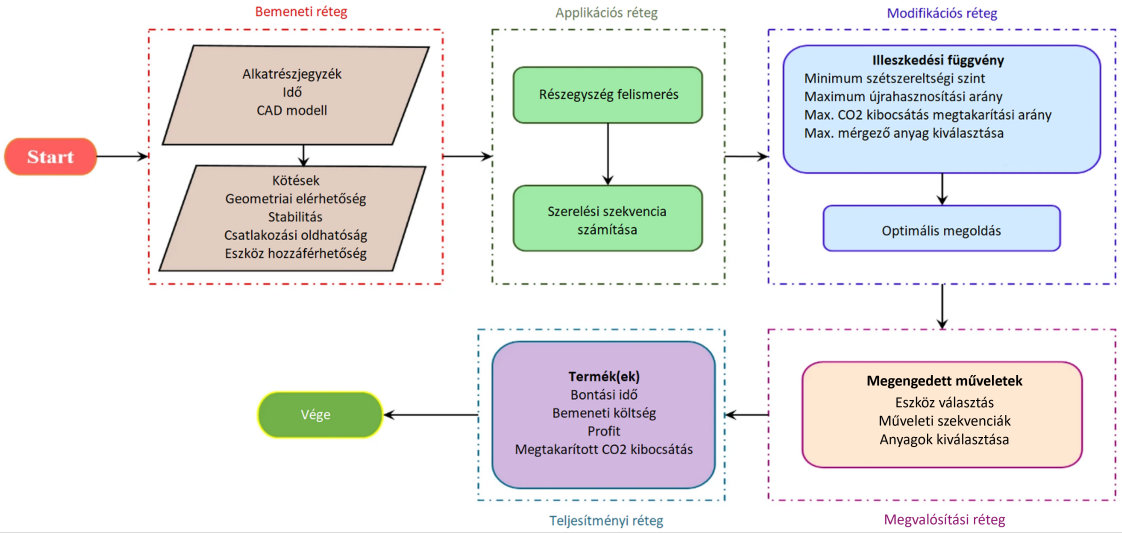
2.3.1. Szétszerelési szekvenciák

Egy EoL (End of Life - életciklus végi) termék feldolgozása idő- és erőforrásigényes, ezért a bontási mérték meghatározása olyan feladat, amelyet megéri optimalizálni gazdasági szempontból. Azonban nehéz számszerűsíteni a benne rejlő a mérnöki megoldásokat, így például egy kötési technológia oldhatóságát, oldásának lépéseit, vagy azok költségeit. Három típusú szétszerelési szekvencia tervezési módszert (DSP - Disassembly Sequence Planning) vizsgálunk:

- teljes szétszerelési szekvencia tervezése (CDSP - Complete DSP): a terméket elemi egységekre bontja. Ezzel minden alkatrész értékét vissza tudjuk nyerni ideális esetben, azonban a bontás hosszadalmas és sok esetben nagyon komplex lehet, ezért ez kevésbé preferált a termékek nagy részénél,
- szelektív szétszerelési szekvencia tervezése (SDSP - Selective DSP): a javítási és karbantartási célok eléréséhez legmegfelelőbb technikaként jelent meg, amelynek célja a termék célzott alkatrészeinek szét- és összeszerelése volt,
- részleges szétszerelési szekvencia tervezése (PDSP - Partial DSP): olyan technika, amely prioritást ad a szétszerelési műveleteknek a kiválasztott alkatrészek eltávolítása érdekében, anélkül, hogy figyelembe venné az újbóli összeszerelés feltételeit. [15]

A-minimum szétszerelтségi szint azt a bontottsági szintet adja meg, amelyen optimális szétszedni a vizsgált terméket a visszanyert anyag mennyisége, az újrahasználhatósági szintje és a bontási idő tekintetében. A vizsgálati módszer folyamatábrája a 2.5 ábrán látható.

Anil Kumar és tsai.[16] által vizsgált termék egy zseblámpa. Ezen a terméken végezték el az algoritmusuk kiértékelését, a 2.5 ábrának megfelelően, majd ezt összehasonlították a szakirodalomban szereplő vetélytársakkal [17, 18, 19]. Az eredményeik alapján az ipari üzemelte-



2.5. ábra. Minimum szétszerelési szintre optimalizálás folyamatábrája (fordítás a [16] forrás alapján)

tőkre szánt költséget negyedére tudták csökkenteni amellett, hogy a CO_2e-megtakarítást közel ötszörösére emelték. A kiértékelések megmutatták, hogy a műveleti költségek jelentették a legnyomósabb paramétert az összes bemeneti adat közül. A tanulmány nagy hangsúlyt fektetett a *Treshold Limit Value – Határérték (TLV)* tartására, ami megadja, hogy mennyi az egyes szerelési műveletek során a maximális kibocsátott anyagok megengedett mértéke, amely még nem okoz károsodást a bontást végző dolgozónak. Az általuk levont konklúziók a következők, melyek említése az én dolgozatomra nézve is fontos:

- A módszer a különböző költségkritériumok figyelembevételével minimális számításigény mellett valid megoldást ad. A részösszeállítások felismerése döntő szerepet játszik a szétszerelési szintek számának csökkentésében, így az anyagvisszanyerés optimális pontjára hatékonyabban érhetjük el.
- A munkaidőben elért megtakarításoknak köszönhetően az EoL-termékeket gazdaságosabb szétszerelési műveletekkel tudjuk elvégezni. A munkaidő kihasználtsága csökkenti a műveleti többletbefektetést, és a bemeneti kiadásokra is pozitívan hat.
- A szisztematikus szétszerelési műveletek végrehajtása a bontás során közvetlenül csökkentette a gép üzemeltetési költségét a maximálisan visszanyerhető értékű alkatrészek újrahasznosításával, és elkerülte a szeparátorok használatát az anyagok szétválasztásához.
- A nagy értékű anyagok újrahasznosítása és az újrahasznosító berendezések, például az aprítógépek villamosenergia-fogyasztása miatt közel 1824 kg CO2-kibocsátásra tudtak minimalizálni. A TLV határokon belül végzett szisztematikus szétszerelési tevékenységekkel teljesen kiküszöbölhető az elektromos/mágneses szeparátor szükségessége.
- A mérgező gázok környezetbe történő kibocsátása minimálisra csökken; a cég által megadott 0,785 TLV értéket hatékonyan kihasználjuk, és a szisztematikus szétszerelési műveletek révén közel 1,18 kg mérgező anyagot különítünk el.
- Ennek a koncepciónak a korlátja a feladatvégrehajtás és az erőforrás-elosztás a nagyobb tömegű EoL-termékek esetében, mivel bizonyos esetekben a meghatározott műveletek

elvégzéséhez elengedhetetlen a robotizált segítség. A kutatás jövőbeli célja a végrehajtási réteg automatizálása az ergonómiai tényezők figyelembevételével, és a javasolt koncepció megvalósítása a különböző EoL-termékeken.

Ez az irodalom nagy segítséget jelentett abban, hogy megértsem, milyen lépések és megoldások léteznek egy adott termék szétszerelésének tervezését illetően. Kutatásom során azt a feltételezést alkalmaztam, hogy a képzett szétszerelési variánsok a fentihez hasonló módszerrel vannak meghatározva, annyi kiegészítéssel, hogy ezt az eljárást általánosítjuk az általunk vizsgált termékekre és egy dizájnelemre nézve átlagos hatékonysággal kerül elvégzésre a művelet.

Az irodalmak nagy része azon ideális esetet veszi figyelembe, ahol az egységek tökéletes állapotban vannak, így szétszedésük minimális időt vesz igénybe, és feltételezések szerint mindig lehetséges roncsolásmentes módon, vagyis a kinyert alkatrészekben nem történik értékromlás a bontási lépések során. Gao és tsai.[12] tanulmánya erre a megközelítésre kínál egy lehetséges valódi megoldást sztochasztikus számítások bevezetésével. A szakirodalom vizsgálatával és szakértői vélemény segítségével két csoportot, azon belül pedig 3-3 vizsgálandó kritériumot említenek a termék bonthatóságának tekintetében. Felosztásuk a 2.6 ábrán látható:

- Fizikai állapot (P1): számszerűsíti az adott alkatrész degradációjának mértékét. Ez alapján az oldási technológia eltérhet, ha rossz az elem, akkor kisebb eséllyel kerül kiválasztásra a szelektív szétszerelési szekvenciában, hiszen az esélye, hogy csak destruktívan lesz szétszedhető.

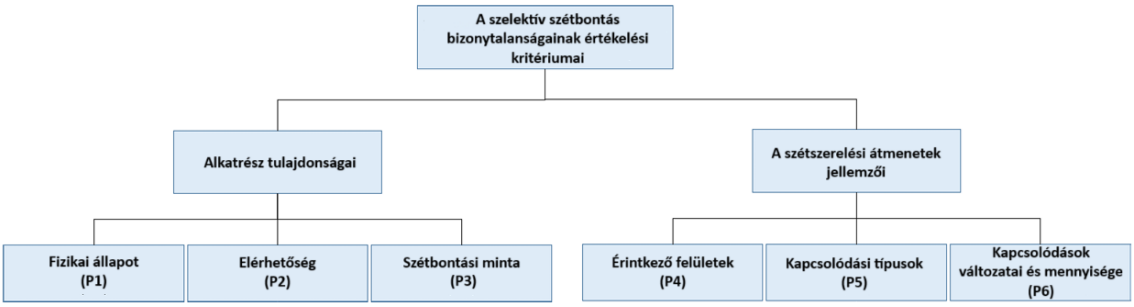
- Elérhetőség (P2): kulcsfontosságú, hiszen a bontási idő jelentős mértékben ettől a kritériumtól függ. Egy szűk helyre besüllyesztett csavar hozzáférése komplikáltabb akár robotok, akár emberek számára.

- Szétbontási minta (P3): leírja a használt eszközöket és módszereket.

- Az érintkező felületek (P4) megadják a szétszedési műveletek komplexitását. Minél több elem áll kapcsolatban egymással, annál komplexebb megoldással lehet csak eltávolítani azokat egymástól, ezzel növelve a szétszerelési időt, és akár rontva a visszanyerhető költségeket.

- A kötési technológiák (P5) meghatározása szintén fontos eleme a pontos számításoknak. Egyszerűbb egy csavart kicsavarni, mint két összehegesztett elemet elválasztani.

- A szétszerelési művelet figyelembe kell, hogy vegye az előzőben tárgyalt kötések számát és variációit is.



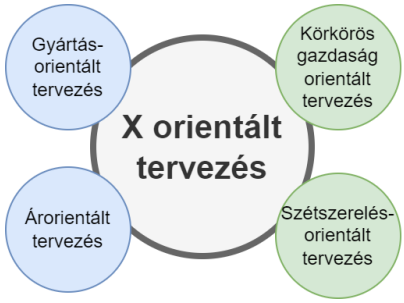
2.6. ábra. Bonthatóság kiértékelési kritériumainak felosztása (a [12] alapján)

Gao és tsai.[12] tanulmánya csatolja az előbb felsorolt kritériumokat 5 minőségi szintre lebontva. Az általuk használt trapéz-felhő-modell (*trapezium cloud model – TCM)* alkalmazá-

sával az említett minőségi értékeket mennyiségi értékké tudták alakítani. Mindezt annak érdekében, hogy a szelektív szétszerelési tervezésben a tervezői megfontolások ellentmondásai miatt adódó információk-bizonytalanság kiértékelésének zavarosságát és véletlenszerűségét csökkentsék.

2.3.2. Orientált tervezési eljárások

Ipari és gyártói szempontból a körforgásos gazdaságra való átállás kihívásokkal jár. A meglévő gyártóüzemek esetében ritkán gazdaságos elsődlegesen fenntarthatósági szempontokat figyelembe venni, mivel ezek túlnyomó része a „gyártsd le–használd–dobd el" elv alapján működik. A gyártósorokat is ezen logika mentén optimalizálták, hogy minél gyorsabb és hatékonyabb termelést tegyenek lehetővé, ezáltal a termékek gyorsan eljussanak a fogyasztókhoz. Egyes gyártási technológiák, mint például a ragasztás vagy a hegesztés, valóban segíthetnek csökkenteni az anyagfelhasználást, így szűkítve a gyártási ciklust és mérsékelve a termelés karbonlábnyomát. Kevesebb anyag felhasználása esetén a termék környezeti hatása is csökkenthető. Ugyanakkor ez a megközelítés csak egy aspektusa a fenntarthatóságnak, és nem nyújt átfogó megoldást. Hiába lett csökkentve gyártáskor a CO_2e-anyagok kibocsátása, a termék életciklusa sokszor még nem zárható be ezen eljárások következtében [20]. Az itt bemutatott tervezést a Gy-OT (Gyártás Orientált Tervezés, angolul a szakirodalomban: Design for Manufacturing and Assembly (DfMA)) elvként lehet megfogalmazni [21]. Benabdellah és tsai.[22] foglalja össze az orientált tervezéseket, és mutatja be az általuk összegyűjtött irodalmakat. A számomra fontos tervezési orientációkat a 2.7 ábra foglalja össze.



2.7. ábra. Általam vizsgált tervezési orientációk

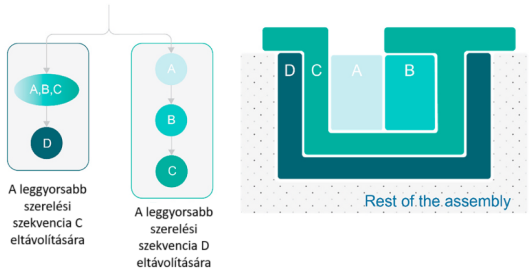
A legyártott termékek élethurkának bezárását segíti elő a KG-OT (Körkörös Gazdaság Orientált Tervezés, angolul szakirodalomban: Design for Circular Economy) [20]. Az Szt-OT megoldások a roncsolásmentes szétszerelést részesítik előnyben, ahol a szétszerelési szekvenciák megtervezése és a szerelési idő/munka jelenti a legnagyobb kihívást. Jelenlegi legnagyobb hátránya az Szt-OT megoldásoknak a tervezésbe integrálásának nehézsége [20]. A megfelelő figyelembevételhez a termék életciklusát követő állapotát is számításba kell venni, például egy rozsdás csavar teljesen tönkreteheti az adott termék szétszerelhetőségét. Az általam végzett számításokban ettől eltekintek és a szétszerelési műveleteket végrehajthatónak tekintem. Későbbi továbbfejlesztési lehetőségként azonban érdemes vizsgálni, hogy az egyes szétszerelési metódusok milyen valószínűséggel hajthatóak végre.

2.3.3. Szétszerelési szekvencia optimalizálása

Szétszerelési lépések meghatározására egyes szakirodalmi példák [23, 12, 24, 16] 3D tervező (CAD (Computer Aided Design - Számítógéppel segített tervezés)) adatokból, geometriai ismeretekre alapozva készítenek algoritmust. Adott termék alkatrészeinek egymáshoz viszonyított elrendezését elemezve következtetnek a kötési technológiára. A szétszerelési szekvenciák elkészítésének első lépése az alkatrészek relatív pozíciójának meghatározása, következő lépés-

ben pedig azok szabadsági foka és a hozzáférhetősége. Ennek a két információnak ismeretéből le tudjuk képezni az adott lépésbeli szétszerelést egy komponensre. Végül minden szereltségi szintre összegezhetjük, hogyan tudjuk oldani a kötési technológiákat. Az oldáshoz szükséges műveletek ismeretében kiszámítható lehet az optimális eljárás.

De Fazio és tsai.[25] manuális szétszerelést követően a geometriai ismeretek segítségével csoportosítja, hogy milyen lépések fordultak elő az elemzett eszközöknél, figyelmet fordítva a komponensek egymástól való függéseire és a szétszedési lépések megvalósíthatóságára. Szétszerelhetőség (angol szakirodalomban: Ease of Disassembly (eDiM) alapján kerülnek értékelésre az egyes csoportok, ahol elemezték, hogy egy adott szétszerelési eljáráshoz mekkora erő és mozdulat szükséges. A 2.8 ábrához hasonlóan további 6, általuk azonosított komponens geometriai csoportosulása került azonosításra, majd ezekhez készítettek optimális szerelési szekvenciát. A munkájuk kimenetele egy úgynevezett szétszerelési térképe az adott terméknek. Ezen a térképen jelölésre kerül, hogy az egyes komponensek milyen lépésekkel kerülhetnek bontásra, milyen nehezítő tényezők fordulhatnak elő, valamint egyéb, a szerelési folyamat szempontjából fontos jellemzők kerülnek jelölésre. Az általam elemzett termékeken hasonló elemzéseket végeztem szakértőkkel együtt, melynek kimenetele a szerelési lépések és lépésekhez tartozó idők lettek. A szerelési időt beszorozva egy dolgozói bérrel, meg tudjuk ítélni a szerelési költséget. Ez szükséges volt ahhoz, hogy a szétszerelési szekvenciát számszerűsítsem, és a későbbiekben számításokat tudjak végezni ennek segítségével. A 2.2.2 fejezetben említett szendvics-architektúrának köszönhetően ezek jó becsléssel általánosíthatók az autóipari vezérlők szempontjából.



2.8. ábra. Szétszerelési szekvencia adott komponens csoport egymáshoz viszonyított elrendeződése esetén [25]. Az gráfos jelölés bal oldalán D eltávolítása, a jobb oldalán C eltávolítása.

A megoldásomban ezt a lépést kihagytam, vagyis nem vettem figyelembe a geometriai relációkat, azokat absztrahálva csak azt határoztam meg, hogy egy szerelési szinten mik azok az alkatrészek, amiket egy adott eljárás során összeszerelünk. Ezzel az egyszerűsítéssel élve a teljes geometriai ismeretet és vizsgálatot ki tudtam hagyni dolgozatomból, az alábbi előnyöket-hátrányokat elemezve: Előnye:

- a geometriai elemző algoritmus szükségtelenné válik,
- gyorsabb implementálhatóság, mivel nincsen szükség a geometriai alapok részleteiben való elemzésére,
- a kötési oldások általánosításának köszönhetően modulárisabb megoldás, mivel nem szükséges külön az egyes termékek elemzése.

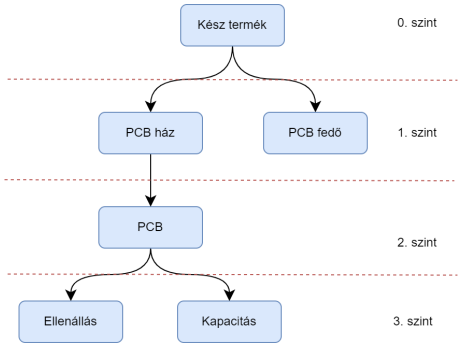
Hátrány:

- információvesztés a szétszerelési eljárásokban, mivel nincsen pontosan lépésekre lebontva a szétszerelés,

- csak közel hasonló szerelési eljárásokkal készített termékcsoportokra ad jó értéket, mivel azoknak hasonlóan értelmezhető a szétszerelése is.

2.3.4. PAC gráfok

Egy termék felépítése és alkotóelemeire bontása jól ábrázolható fagráf segítségével. A gyökér mindig maga a termék, míg az alsóbb szinteken az egyes alkomponensek találhatóak. Minden egyes újabb szint a termék további szétbontásával feltárható alkatrészeket jeleníti meg. A 2.9 ábrán egy egyszerűsített vezérlő fagráfos reprezentációja látható. A gráf négy szétszerelési szintet mutat be, melyeken keresztül követhető, hogy a végterméktől indulva hogyan jutunk el az apróbb elektronikai alkatrészekig, és hogy mely komponenseket kell szétszerelni a mélyebb szinteken elhelyezkedő részek eléréséhez. A gráfos ábrázolás célja, hogy mind számítógépes, mind emberi olvasatban könnyen értelmezhető, egyszerűsített képet adjon a termékről és azok komponenseiről.



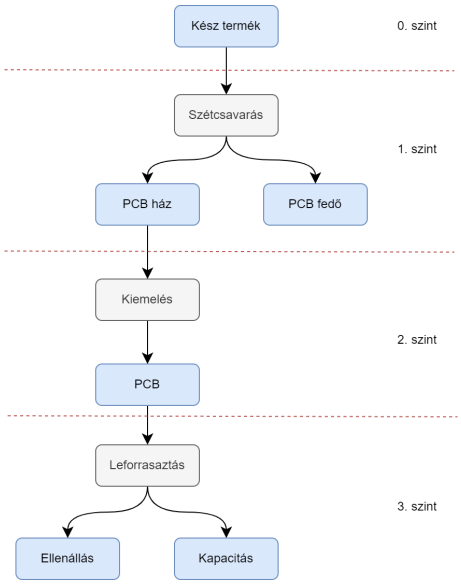
2.9. ábra. Fagráfos felbontása a termékeknek

Formentini és Ramanujan[20] vezettek be cikkükben egy megoldást, mely az egyes szintek közötti szerelési eljárásokat is figyelembe veszi, ezt nevekezik "szülő-eljárás-gyermek" (PAC - angolul: Parent-Action-Children) gráfnak. Egyes szintek közé beszúrásra kerül a kötési technológia mint a gyermekeket összefogó pontja a fagráfnak. Kiegészítve az eljárásokkal a 2.9 ábrán látható példaterméket további elemzési lehetőségek tárulnak fel, melyek szükségesek az Szt-OT elemzéshez [20]. A 2.10 ábrán látható, hogyan néz ki a továbbfejlesztett gráf a szerelési eljárások beillesztését követően.

A szerzők ennek segítségével elemezték az oldási eljárásokat a gyermekekre való hatások szempontjából. 3 csoportot azonosítottak, melyeknek további alcsoportjaira is kitértek az elemzés során. Az általuk implementált megoldásokat saját számításaimban a *roncsolási indexként* számszerűsítve vettem figyelembe.

2.4. Adatra optimalizálás és mesterséges intelligencia a körkörösségben

A nagy adatmennyiségek feldolgozásával és elemzésével kimutathatóak olyan optimális megoldások, melyekre csupán intuícióval nehezen lehet következtetni vagy bizonyítani. Ennek egyik fontos eszköze az adatalapú optimalizálás és a mesterséges intelligencia (MI). A következő fejezetekben kitérek rá, hogy milyen megoldásokkal találkoztam a körkörösségre tervezésnek az adatalapú optimalizációval való összekötésében, és milyen megközelítésben használták az MI-t a hulladékgazdálkodásban.



2.10. ábra. Fagráf PAC elven felrajzolva a példa termékre.

2.4.1. Adatra optimalizálás megjelenése a körkörösségben

Gao és tsai.[12] cikkében sztochasztikus megoldással kiegészítve készítettek optimalizációt a szétszerelésre. Saját megoldásukban úgynevezett mesterséges méhkolónia algoritmust használtak, melyet pontosan dokumentálva mutatnak be. Nekik a cél a véletlenszerűség figyelembevétele volt, ezért az optimalizációjukban a kényszereket ezek jelentették. A másik szempont a geometriai szétszerelési lehetőségek voltak, kimenetelük pedig a szerelési műveletek száma volt. Eljárásuk tanulságos volt számomra, azonban mivel az általam vizsgált kényszerek és kimenetelek ettől jelentősen eltérőek, így az algoritmusuk beépítése nem volt előnyös.

Allagui és tsai.[26] cikkében bemutatott megoldás megerősítéses gépi tanuláson alapul. Kimeneti értékük a szétszerelési időt, szerelőeszköz-cserét és a szerelési irányt hivatott minimalizálni. A vizsgált szerelési szekvenciáik a PDSP és FDSP. A módszerükjöz szintén 3D CAD adatokat használtak, és a geometriából állapították meg a szereléshez szükséges lépéseket. Az újításuk az úgynevezett Q-hálózat alkalmazása felügyelt tanulásos szétszerelési szekvencia tervezéséhez.

Lee és tsai.[27] cikke teljesen a megvalósíthatóság közelségébe hozza a szétszerelési szekvenciákat, konkrét robot és emberi kollaborációra optimalizálva azokat. Bemeneti adataik szintén geometriai adatok, azonban tanulmányukban az emberi pozíciót és annak relatív helyzetét a szerelendő termékhez és robothoz képest figyelték. Ezek segítségével tudták a szétszerelési lépések hatékonyságát növelni, befolyásolva az emberi operátorok helyzetét minden elvégzett művelet után. A tervező program minden pozícióváltásra reagál, és mindig megadja az ideálisnak ítélt következő ember-robot kollaborációs feladatot.

2.4.2. Mesterséges intelligencia és a fenntarthatóság

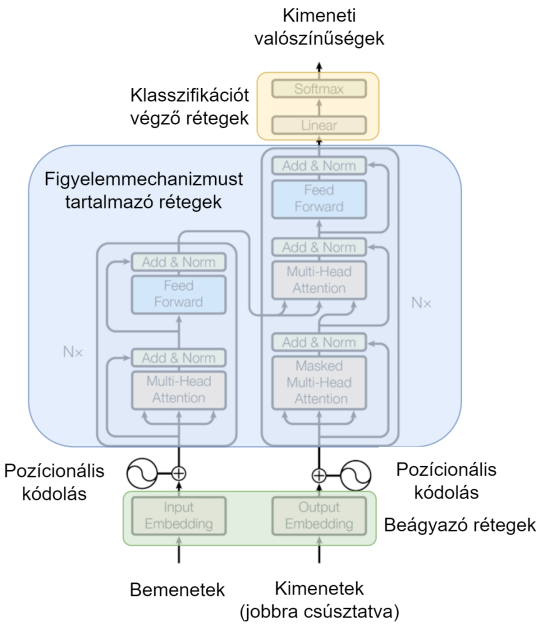
A mesterséges intelligencia térnyerése a fenntarthatósági témákat is érinti. Mivel a hulladék anyagcsoportokba osztása elengedhetetlen lépése az újrahasznosításnak, ezért sok különböző megoldás lett kifejlesztve, mely ezt a problémát célozza. Az egyik ilyen megoldás a Nañez Alonso és tsai.[28] cikkében bemutatott konvolúciós neurális háló (CNN - angolul: Convolutional Neural Network), mely a háztartási cikkeket hivatott 4 csoportba osztani: papír-, műanyag-, bio- és üveghulladék. Kutatásuk eredménye egy CNN, mely 90%-os megbízhatósággal képes csoportosítani a vizsgált hulladékokat. Kutatásomban ennél több csoport vizsgálata szükséges,

valamint azokat nagyobb részletességgel célszerű vizsgálni, ezért a megoldás nem került implementálásra a kutatásomban.

Wilts és tsai.[29] cikkje már pontosabb hulladékazonosítást hivatott megvalósítani. A 13 anyagcsoportra betanított háló 90%-os pontossággal tudta felismerni az anyagokat. A pontosság ígéretes, azonban az anyagcsoport száma továbbra sem kellően nagy. Az általam vizsgált infrastruktúrában kb. 50 db anyagcsoport ismert, melyek nagy változékonyságú formában fordulhatnak elő. A képi adatok feldolgozása újabb nagy feladatot jelentene, mivel minden egyes anyagcsoporthoz minél több különböző termékformát ábrázoló kép szükségeltetne. Figyelembe véve az előző indokokat, az anyagcsoportosításnak egy új megközelítését implementáltam kutatásomban, melyet a 2.5 fejezetben mutatok be.

2.4.3. Nagy nyelvi modellek

A nagy nyelvi modellek (angolul: Large Language Models (LLM)) a mesterséges intelligencia egy alcsoportja, mely forradalmi változást hozott a természetes nyelvfeldolgozásban. Az LLMek fejlődése, különösen a Vaswani[30] által bemutatott Transformer architektúrát használó modellek megjelenésével lehetőség nyílt komplexebb szövegértési, elemzési és generálási feladatok végrehajtására. A 2.11 ábrán látható kifejlesztett architektúra felépítése, melynek újdonsága, hogy szakított az addigi klasszikus konvolúciós és rekurrens neurális hálók alkalmazásával, helyette úgynevezett *figyelemmechanizmusra* épülő struktúrát vezetett be. A figyelemmechanizmus révén a modell a szöveg szekvenciájában található szavak közötti kontextuális kapcsolat azonosítására fókuszál. A megoldás gyorsabb és rugalmasabb feldolgozást eredményez, ez a rugalmasság vált számomra szükségessé a komponensek névalapú anyagcsoportokba rendezéséhez.



2.11. ábra. Figyelemmechanizmusra épülő Transformers architektúra és azok számomra szükséges részei [30].

A saját kutatásomban a Transformer architektúrát arra használtam, hogy automatizáljam az anyagcsoportba rendezést. A Robert Bosch Kft.-nek köszönhetően rendelkezésre állt megfelelő mennyiségű adat, mely segítségével finomhangoltam a modelleket. A 2.11 ábrán megjelölt architektúra-egységek tanítási sebességtől és pontosságtól függő szerepét is vizsgáltam. A

Wolf[31] által bemutatott, az oldalukon található Transformer architektúrák közül tudtam kiválasztani a számomra megfelelő modellt, melyet a későbbiekben saját célra betanítottam.

2.5. Kutatásom újdonsága

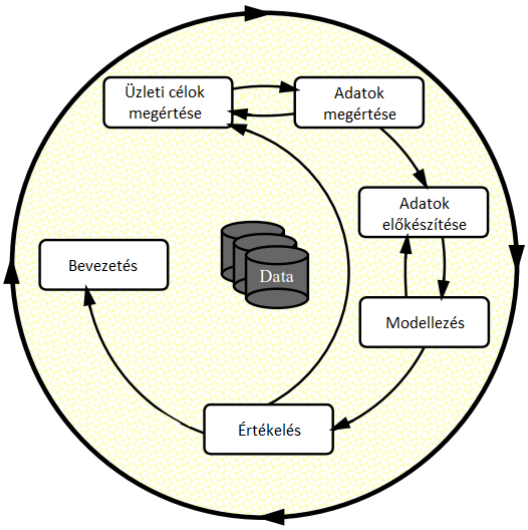
A 2.3.4 fejezetben bemutatott PAC gráfok használata előnyös, hogy elemezhessük a szétszerelhetőségét a vizsgált termékünknek. Segít értelmezni a szétszereléskor felmerülő nehézségeket és az azokból következő értékromlást. Azonban Formentini és Ramanujan[20] cikkükben csak egy lehetséges szerelési eljárási metódust vettek figyelembe, nem került említésre, hogy egy kötési technológiának több más oldási variánsa is létezhet. A dolgozatomban a 2.10 gráfot kiegészítem további lehetséges szétszerelési variánsokkal, ezzel pontosabb képet kapva a várható értékvisszanyerési stratégiákról. Az értékvisszanyerést [EUR]-ban fejezem ki, amely a kiszámított szétszerelési szekvencia elvégzését követő felvásárlási árak alapján adott becslésből kapható. Az optimális szétszerelési szekvencia meghatározására kettő módszert is bemutatok, az első egy heurisztikus optimalizációs algoritmus, mely a variánsokkal kibővített PAC gráfok lokális maximumainak összegzéseként számítja ki a várható megtérülést. A második módszerrel az összes lehető szétszerelési szekvencia ábrázolható egy *Munka - Megtérülés* diagramon, így további elemzési lehetőséget biztosítva a termék körkörösségi potenciálját vizsgálva. A fejlesztett szoftverkeretrendszer modularitását mutatja annak többcélúságra bővíthetősége, valamint technológiai és norma szerinti szűrési lehetőségei.

Másik újdonsága az anyagcsoportosításra használt nyelvi modell bevezetése. Az 2.4.2 fejezetben bemutatott MI-t használó hulladékválogató megoldásokkal szembeni új megközelítésnek számít egy nyelvi modell alkalmazása erre a célra. A [28, 29] irodalmakban bemutatott hulladékcsoportosítók 4 és 13 csoportot képesek azonosítani. Az én metódusom ezt 33-ra bővíti, mely szélesíti a megoldás potenciális felhasználását. A finomhangolt nyelvi modellek közül elemzések segítségével kiválasztom a legjobban klasszifikálót. A számítási igény csökkentésének érdekében optimalizációs módszerekkel kísérletezek, hogy a későbbi adatfeldolgozások a lehető legkisebb karbonlábnyommal történjenek.

3. fejezet

Az algoritmus fejlesztése

Az általam tervezett szoftverkeretrendszer bemutatásához a CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining) módszert választottam. Ez a módszertan 1990 óta bizonyítja hatékonyságát az adatbányászatot igénylő projektekben, és lehetővé teszi az agilis gondolkodásmód beépítését a fejlesztési folyamatokba [32]. A 3.1 ábrán látható lépések alapján a fejlesztési folyamat egy olyan keretet kap, amely biztosítja a folyamatos visszacsatolást és az iteratív javítást. Ezáltal minden egyes szakaszban, az újonnan megszerzett ismeretek birtokában, újra tudjuk értékelni a megoldás sikerességét.

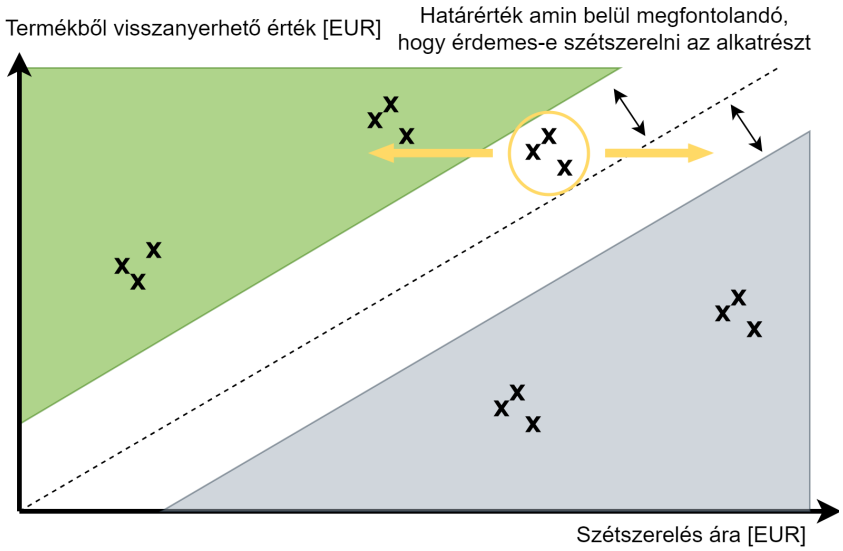


3.1. ábra. CRISP-DM [32]

Az üzleti célok megértése és az adatok előkészítése alapozza meg a fejlesztés irányát, míg a modellezés és az értékelés folyamata során lehetőség nyílik az algoritmusok finomhangolására, valamint a potenciális hibák vagy gyengeségek azonosítására. A módszer lehetővé teszi, hogy a fejlesztés során bármikor visszalépjünk a korábbi szakaszokhoz, így az új adatok vagy ismeretek alapján javíthatjuk a modellt, és optimalizálhatjuk az eredményeket. Számomra a sorrend fontos pont volt, hiszen ahogy a 3.3 fejezetben látható, sok különböző helyről származik a használt adat, így első lépésként ezeket kellett felderítenem. Miután felmértem az adatokat, vissza kellett csatolnom, hogy mik azok a kimutatások, amelyeket lehetővé tesz az adatminőség.

3.1. Üzleti célok megértése

A célom megmutatni, hogy a vizsgált termék/termékportfólió milyen mértékben felel meg a körkörös gazdaság által támasztott elvárásoknak, vagyis a termék az életciklusát követően újragyártási/újrahasznosítási eljárással továbbra is kimutatható piaci értéket képezzen. Ha a termék megfelel ennek az elvárásnak, akkor a gyártónak is érdekében állhat újrahasznosításban gondolkodnia. A kérdés egyszerűsítésére a 3.2 diagramon szereplő értékek kiszámításából következtetek az újrahasznosíthatóságra. A diagram a szétszerelési érték függvényében mutatja be a visszanyerhető értéket. A középen húzódó egyenes egy határként értelmezhető, amelyet átlépve a szétszerelési szekvencia értékei a diagram zöld területére esnek, akkor elmondható, hogy az a termék a szétszerelési metódusok becsült árához képest anyagi újrahasznosításból származó realizálható érték nyerhető ki. Ha egy termékhez kiszámítható ilyen érték, akkor azt érdemes újrahasznosítási céllal szétbontani, míg ha egy meghatározott értéken túl a középső egyenes alá esik a visszanyerhető érték, akkor az kevésbé felel meg a körkörösségre tervezés elvének, és nem érdemes újrahasznosítás céljából szétszerelni. A határvonal körüli sáv szélessége szabadon választható, az ide eső pontok esetén megfontolandó a szétszerelés végrehajtása, mert annak alacsony a megtérülése.



3.2. ábra. Kimeneti diagram, mely segíti meghozni a szétszerelési döntést. A keresztek egy szétszerelési szekvencia értékeit jelölik.

3.1.1. Az általam vizsgált termék részei

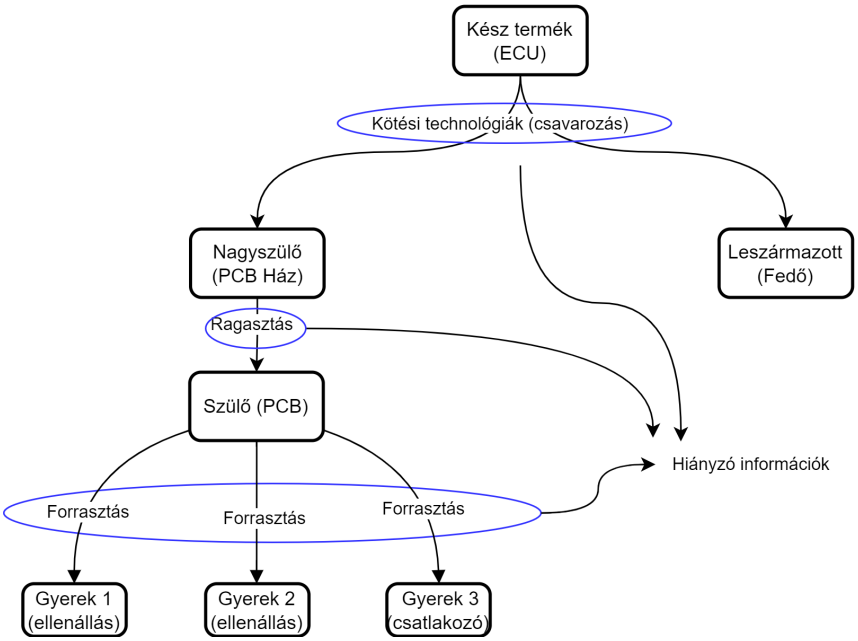
A kutatásomhoz a Robert Bosch Kft. rendelkezésemre bocsátotta infrastruktúráját, így elemzéseimet ezen tudtam végezni. Mivel egy nagy multinacionális cégről van szó, nagyon összetett termékportfóliók jellemzik. Gyárai számos lokációkon megtalálható, és ezek fejlettsége, az általuk használt technológiák és szolgáltatott adataik eltérőek lehetnek. Egy termék felépítésének adatalapú reprezentációját felmérni, és egy helyen kezelni nehézkes feladatnak számított. A termékek elemzéséből a 2.2.2 fejezetben ismertetett általános következtetéseket tudtam levonni a vizsgált termék portfóliójának elemzéséből. A termék fadiagramos elemzéséhez szükséges adatok:

- Alkatrészjegyzék:
  - Termék és alkomponenseinek elnevezése,

  - Termék felépítése (összeszereltségi szintek),
  - Komponensek tömege,
- Termék komponenseit összekötő technológiák.

Az alkatrészjegyzék és az abból szükséges adatok rendelkezésre álltak. Elemzésük elsősorban az adattisztítási eljárásokat tartalmazta a felmerülő redundáns adatok kiszűrésére. A tisztított adatok már egy felépíthető termék alkomponenseit kell, hogy tartalmazzák, mint a 3.3 ábrán látható fagráfhoz hasonló fekete dobozok.

Következő lépés a komponensek értékének meghatározása. Az újrahasznosítási értéket az alkomponens azonosított alapanyagához tartozó felvásárlási egységárból képzem. Ehhez rendelkezésre állt a komponens tömege, azonban az anyagcsoportba osztása további vizsgálatot igényelt, melyet a 2.4.3 fejezetben szereplő LLM-et alkalmazó megoldás megvalósításával kezeltem az algoritmusom fejlesztése során.



3.3. ábra. Kezdetben rendelkezésre álló alkatrészjegyzékből létrehozható fagráf, hiányzó kötési technológiákkal.

3.1.2. Kötési-oldási technológiák

A 3.2 ábrán szereplő diagram meghatározásához szükséges szétszerelési eljárások értékének becslése kihívást jelentett. A 3.3 ábrán látható kékkel jelölt elemek, vagyis a kötési technológiák nem szerepeltek az alkatrészjegyzékben, így szükséges volt további adatforrást keresni. Az oldási technológiák nehézségének meghatározására az EN45554:2020 [33] normák álltak rendelkezésemre, mely csoportosítja a szétszerelési eljárásokat különböző releváns szempontok szerint.

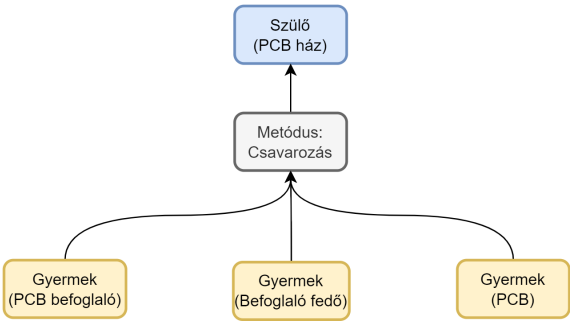
3.1.3. Projekt tervezése

A 3.1.1 és a 3.1.2 fejezetekben ismertetett adatok feltárása, elemzése és rendezése az első lépés a kimeneti diagram előállításához. A 3.2 fejezetben részletezem, hogyan tudtam pótolni a hiányzó adatokat, valamint milyen további forrásokat vizsgáltam, melyek végül is zsákutcának

bizonyultak, de vizsgálatuk hasznos információkkal és tapasztalatokkal gazdagított. Levonom a következtetéseket az adatok mennyiségét és minőségét illetően, valamint, hogy milyen szűrésre és keresőtáblákra lesz szükség. A 3.3 fejezetben bemutatom, hogyan néz ki a digitális formája az alkatrészjegyzéknek egy példatermék esetében. Kifejtem, hogyan tudtam megállapítani az összeszerelési technológiákat, mi alapján csoportosítottam őket, illetve hogyan kapcsoltam hozzájuk a szétszerelési eljárásokat. A 3.4 pontban részletezem, milyen nyelvi modellek alkalmazását vizsgáltam meg, miért ezeket választottam, és hogyan tanítottam őket. A szétszerelési szekvencia optimalizálására szolgáló algoritmus is ebben a fejezetben kerül tárgyalásra. A CRISP-DM esetében a következő rész a kiértékelés lenne, azonban a dolgozat szempontjából ezt a részt átformázom, és egybeveszem az eredményekkel. A bevezetést, alkalmazásorientált eredményeket mutatom be. A 4.1 fejezetben elemzem, hogy a különböző LLM tanítási módszerek milyen pontosságúak, valamint a megtervezett algoritmus milyen szétszerelési szekvenciát eredményezett, jelentősen kisebb számítási igénnyel.

3.2. Adatok megértése

A 2.3.4 fejezetben bemutatott PAC fagráf módszerrel elemzem az egyes termékeket. A fagráf számszerűsítéséhez a 3.4 ábrán látható adatok szükségesek. Mivel ezek nem álltak rendelkezésre egy adatbázisban egyszerre, ezért kiterjesztettem az adatforrások elemzését. A 3.4 ábrán egy PAC gráfot látunk, alul 3 gyermek, amelyeket a felettük jelölt metódussal összeszerelve kapjuk meg az ábra tetején szereplő szülő alkatrészt. A cél, hogy a nyilak ellentétes irányát, vagyis a szétszerelést is tudjuk értelmezni. Kutatásom újdonsága, hogy az egyes összeszerelésekhez több szétszerelési eljárást is értelmezünk, így megnövelve a kimeneti eredmények halmazát. Az össze- és szétszerelés közötti kapcsolatot a 3.2.3 fejezetben fejtem ki, a variánsok képzését pedig a 3.2.4 fejezetben részletezem.



3.4. ábra. PAC gráf felépítése és értékei melyeket a későbbi számításokban használtam.

3.2.1. Alkatrészjegyzék digitális formája

Az általam hozzáfért digitális alkatrészjegyzékek azonos formát követnek. Az elemzés eredményeként számomra az algoritmus elvárt működéséhez az alábbi adatok lesznek fontosak:

- Minden alkatrész rendelkezik egy egyedi azonosítóval, azonban egy adott alkatrészből (pl.: ellenállásból) több is szerepelhet egy beépülésnél,
- Minden alkatrész rendelkezik egy elnevezéssel,
- Minden alkatrészből jelölve van a mennyisége és a mennyiség mértékegysége (pl.: darab (db), gramm (g) stb..)

Ezeken felül az elemekhez fel vannak tüntetve például a gyártási/származási hely, dokumentumainak azonosítója, stb. azonban ezek a 3.3 fejezetben kiszűrésre kerülnek.

3.2.2. Szerelési technológiák feltárása

Az alkatrészjegyzékek nem tartalmaznak kötési technológiára vonatkozó információkat, így azokhoz más forrásból kellett hozzáférnem. A 2.3.3 fejezetben megismert szakirodalmak CAD modellek geometriai adataiból számítják ki a szétszereléshez szükséges információkat, ezért kézenfekvő volt nekem is ebbe az irányba elindulni.

A 2.3.3 fejezetben ismertetett előnyökre támaszkodva a kutatásomban nem térek ki termékek szétszerelési szekvenciájának geometriai megvalósíthatóságára, azokat általánosítva vizsgálom. Egy csavarozás oldási eljárásának geometriai megvalósíthatósága részben attól függ, hogy milyen rendelkezésünkre álló eszközök vannak (pl.: csavarhúzó egy szerelő kezében vagy automatikus csavarhúzó állomás, amely szétszerelésre van programozva). Azonban ez az információ már a terméket feldolgozó központ adottságaitól függ, ezért a szoftverkeretrendszer kidolgozásához nem tartottam szükségesnek kitérni a részleteire.

A Robert Bosch Kft. gyárainak ipari fejlettségéből és modernségéből adódóan egyes termékekre vonatkozó szerelési információk a gyárakban a műveletek rögzítésének köszönhetően elérhetőek. Minden szerelési műveletnél rögzítésre kerülnek a beépülő alkatrészek egyedi azonosítója, valamint az így létrejövő termék egyedi azonosítója. Ezt az információt használtam fel kapcsolásként az alkatrészjegyzék és a szerelési műveletek között. Ezekből az információkból felépíthető a PAC gráf az összeépülési irányba, mint ahogy az a 3.4 ábrán is látszik.

3.2.3. Szétszerelési technológiák kapcsolása összeszerelési technológiákhoz

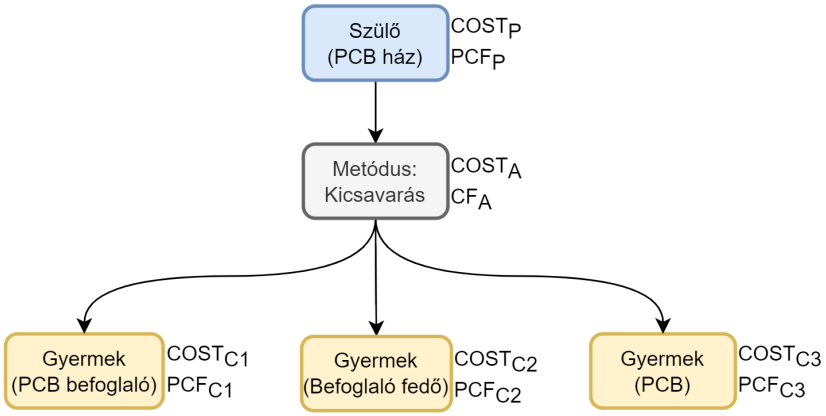
Az azonosított összeszerelési lépésekből következtetni tudunk, hogy melyek rendelkeznek komponenseket összekötő technológiákra vonatkozó információval. Ez az információ általában egy elnevezés (pl.: csavar meghúzás) de tartalmazhat erre az eljárás fizikai/mechanikai jellemzőire vonatkozó információkat is. Én az elnevezést véltem fontos információnak, mivel manuálisan képezhető hozzá az oldási technológiája (pl.: csavarozásnak az oldása a kicsavarozás). Vizsgált termékekhez a szerelési eljárásokat összegyűjtve hoztam létre a keresőtáblázatot, mely tartalmazza az összeszerelési és ahhoz csatolva a szétszerelési eljárást. A keresőtábla további részleteire a 3.3 fejezetben térek ki. A PAC gráf szétszerelésre a 3.5 ábrán látható, ahol:

- $COST_P$ a szülő értéke, PCF_P pedig a karbonlábnyoma szétszerelés előtt,
- $COST_A$ a szétszerelés értéke, CF_A pedig a karbonlábnyoma,
- $COST_{C1,2,3}$ a gyermekek értéke, $CF_{C1,2,3}$ pedig a karbonlábnyoma.

3.2.4. Szétszerelési variánsok képzése

A PAC gráfok szétszerelést tekintve csak egy megoldást vesznek figyelembe gráfonként [20]. Szerelési tapasztalatokból tanulva, definiáltam az egyes kötési technológiákhoz több szétszerelési metódust is. A csavarozási példával élve, az alábbi variánsok értelmezhetőek:

- szétcsavarozás,
- csavar felfúrása,
- csavar levágása,
- ház körbemarása,



3.5. ábra. PAC gráf szétszerelésre értelmezve.

- vagy a teljes komponens bedarálása.

Az egyes eljárásokhoz mind más szerelési környezet és megvalósíthatóság kapcsolható. Ezek csoportosítását az DIN EN 45554:2020[33] norma szerint végeztem el. A norma a javításhoz, újrahasználás és fejlesztéshez szükséges eljárásokat értékeli azok megvalósíthatósága szerint. Számomra ebből releváns értékelési szempontok:

- Kötési technológiák osztályozása:
  - újrahasználható (A osztály),
  - eltávolítható (B osztály),
  - nem újrahasználható és nem eltávolítható (C osztály).
- Javításhoz, vagy szétszereléshez szükséges eszközök:
  - megvalósítható eszköz nélkül/alapvető eszközökkel/a termékhez járó eszközökkel (A osztály),
  - a termékcsaládra jellemző eszközökkel valósítható meg, vagyis nem része az A osztályban felsorolt egyszerű eszközökkel (B osztály),
  - egyéb kereskedelmi forgalomban elérhető (de a fentebbi osztályokban nem szereplő) eszközökkel valósítható meg (C osztály),
  - csak céleszközökkel megvalósítható a szerelési eljárás (D osztály),
  - nem megvalósítható semmilyen létező eszközzel (E osztály).
- Képességi besorolás:
  - laikus (A osztály),
  - általános készségszint (laikus számára nem megvalósítható, de a javításról szerzett általános ismeretekkel már elvégezhető) (B osztály),
  - szakértő (rendelkezik valamilyen szakképzéssel, amellyel elvégezhető az javítási művelet) (C osztály),
  - gyártó vagy hivatalos szakértő, aki az adott termék gyártójától rendelkezik képzéssel a javítás/szétszerelés elvégzésére (D osztály),
  - nem megvalósítható semmilyen képzettségi szinten (E osztály).

Minden szétszereléshez szakértői segítséggel meghatároztuk az osztályokat, amelyek az össze- és szétszerelés keresőtáblába bekerültek.

3.1. táblázat. Az egyszerűsített termék kiindulási alkatrészjegyzéke

Szint	Szülő UID	Szülő leírás	Gyermek UID	Gyermek leírás	Mennyiség	UOM	Tömeg	UOM
0	1001	termék	1001	végső összeszerelés	1	db	1100	g
1	1001	végső összeszerelés	1002	ház	1	db	600	g
1	1001	végső összeszerelés	1003	fedő	1	db	400	g
1	1001	végső összeszerelés	1004	csavar	6	db	100	g
2	1002	ház	1005	pcb	1	db	300	g
2	1002	ház	1006	ház anyaga	1	db	200	g
2	1002	ház	1007	konnektor, pinek	1	db	90	g
2	1002	ház	1008	szigetelő	20	g	20	g
3	1005	pcb	1009	C 680µF	4	db	5	g
3	1005	pcb	1010	IC	2	db	10	g
3	1005	pcb	1011	R	10	db	2	g
3	1005	pcb	1012	L 3.8uH	4	db	5	g
3	1005	pcb	1013	R 68R	2	db	10	g
3	1007	konnektor, pinek	1014	konnektor	1	db	10	g
3	1007	konnektor, pinek	1015	pinek	100	db	0,8	g

3.2.5. Adatok összefoglalása

A Robert Bosch Kft.-ben már egy futó projekthez csatlakoztam, melyhez kapcsolódik a kutatási témám is. A projektben már történt anyagcsoportok alapján való értékbecslés. Felméréseim eredményeként nagyjából 2700 darab cimkézett adat állt rendelkezésemre. Az adatok vizsgálatát követően az volt a feltételezésem, hogy a manuális cimkézést tudná helyettesíteni egy finomhangolt LLM is.

Az általam vizsgált céges infrastruktúrában élhetünk azzal a feltételezéssel, hogy minden szétszerelésre vizsgálandó termék esetében rendelkezésre állnak az előzőekben bemutatott szerelési adatok, így a felépítendő adatfolyam megbízható lesz. A ráépített szoftverkeretrendszer automatizálható, értékei és számításai reprodukálhatóak lesznek, így biztosítva a skálázhatóságot.

3.3. Adatok előkészítése

Az 3.2 fejezet elemzéseinek kimeneteként ismertté válltak az elérhető adatforrások. Termékfelelősökkel és gyári szakértőkkel való egyeztetések, valamint ipari digitalizációért felelős kollegáktól összegyűjtött információk kimeneteleként a 3.6 ábrán látható adatfolyamot állítottam össze. Így tudtam biztosítani, hogy a Formentini és Ramanujan[20] által kimutatott Szt-OT elemzéshez szükséges adatok rendelkezésre álljanak.

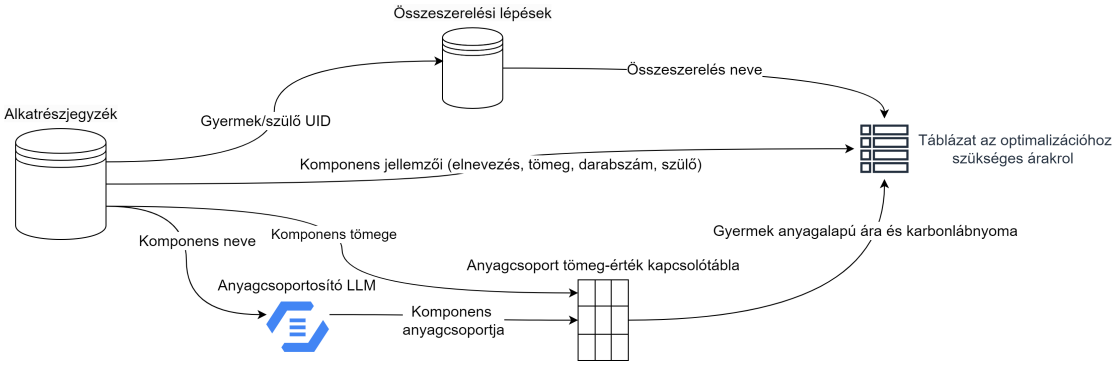
3.3.1. Szülő-gyermek kapcsolatok a darabjegyzékben

A kiindulási adathalmaz a 3.2.1 fejezetben ismertetett alkatrészjegyzék volt. Dolgozatomban egy általánosított és egyszerűsített terméket összeállítva mutatom be a használt adatokat. Ennek alkatrészjegyzéke a 3.1 táblázatban látható, mely már egy letisztított/megszűrt alkatrészjegyzéknek számít. A szülő és gyermek egyedi azonosítók (angolul: Unique IDentifier (UID)) egy számsorozat, mely minden komponensre egyedi, így biztosítva a megkülönböztethetőséget. Ezeket az egyedi azonosítókat fogom keresni a gyártósori adatbázisban, hogy megtalálja az összeszerelési eljárást. Az anyagcsoportosítást a "Gyermek leírás" oszlop alapján végzem. Az UOM (Unit of Measurement) oszlopban a mértékegységek találhatóak.

3.3.2. Adatfolyam felépítése

Az adatfolyam felépítése a 3.6 ábrán látható. Az adatfolyam a vizsgált alkatrész definiálásával kezdődik. Ha elérhető a termék alkatrészjegyzéke, akkor annak adatait felhasználva a következő oszlopokkal bővítem a 3.1 táblázatot:

- **Összeszerelési folyamatok**, melyeket gyári adatbázisokból nyerek ki az egyedi azonosítók segítségével. Ezt minden sorban, vagyis minden szülő-gyerek kapcsolathoz megkeresem és rögzítem. Egy szinten több azonos összeszerelési eljárás azt jelenti, hogy az adott eljárással több elem épült be egyszerre, például ragasztásnál a ragasztó és az általa összetartott elemek is egy azonos folyamattal hozzák létre a szülőt.
- **Komponens értéke**, a komponens azonosított anyagcsoportjának az $[EUR/tonna]$ értékét megszorozva a tömegével, kiadja annak értékét.
- **Komponens karbonlábnyoma**, a komponens azonosított anyagcsoportjának a $[CO_2e/EUR]$ értékét megszorozva az $[EUR]$ értékével, meghatározza annak karbonlábnyomát.



3.6. ábra. Az optimalizációhoz szükséges adattáblák összeállításának folyamatábrája.

Az anyagok újrahasznosítási értéke földrajzi helytől és országtól függő értéknek számít. Dolgozatomban az eredmények bemutatásához így kézenfekvő volt magyarországi értékeket használni, ahol rendelkezésre álltak.

- Alumínium méhtelepi felvásárlási árakat a MOHU oldalon találtam [34],
- Ötvözött acél forrása Prognos[35],
- Réz ötvözetek szintén a MOHU felvásárlási értékét vettem alapul [34],
- Hőálló műanyagok forrása a Plastic Portal[36],
- PCB felvásárlási árakat a Boardsort[37] európai felvásárlónál találtam,
- karbonlábnyom értékének meghatározásához pedig a Climatiq[38] oldalon talált információkat használtam fel.

Az anyagok CO_2e értéke esetén volt, hogy $[CO_2e/kg]$, de volt, hogy $[CO_2e/EUR]$ értékben határozták meg, egységesítve mindenhol $[CO_2e/EUR]$ értéket adtam meg. A fenti adatok segítségével készítettem el a számoláshoz használt 3.2 táblázatot.

Az anyagcsoportosításra finomhangolt LLM Transformer bemenetként megkapja a komponens elnevezését, kimenetelként pedig visszaadja a legnagyobb eséllyel azonosított anyagcsoportot. A 3.2.1 fejezetben bemutatott alkatrészjegyzékhez lett hozzáadva egy további oszlop,

3.2. táblázat. Anyagcsoportok tömegára

Anyagcsoport	EUR/tonna	CO2e/EUR
Nem definiált	100	1
Nagy ötvözöttségű acél	2000	2,7955
Alumínium és ötvözetei	893	16,2322
Réz ötvözetek	2435	6,3009
Hőálló műanyagok	900	6,7970
Ragasztók és szigetelő anyagok	0	0
Nagy elektronikák (PCB, kijelzők, stb)	3600	0,1908
Kis elektronikák (SMD alkatrészek)	2,5000	0,2213

ahol szerepeltek az anyagcsoportok. Összegyűjtöttem az összes ilyen táblázatot, ahol már korábban megtörtént a kézzel történő beírása az anyagcsoportoknak. Kinyerve a két fontos oszlopot, vagyis *gyermek elnevezés* és *anyagcsoport* oszlopokat, majd elkészítettem egy tanító és teszt adathalmazt. A halmazt vizsgálva 33 anyagcsoport került azonosításra.

A 3.6 ábrán látható keresőtábla olyan táblázatot jelöl, melyek a keretrendszer korai fázisát tekintve manuális feltöltést igényeltek. Többszöri módszeresen iterációs lépés, kivitelezés eredményeként jöttek létre, előnyük ebből adódóan, hogy teret adnak további fejlesztési lehetőségeknek. Így például megkíséreltem a szétszerelési eljárásokahoz tartozó fajlagos széndioxid ekvivalens érték meghatározását, azonban ezen folyamatok kibocsátásának mértéke a termék komponenseihez képest csekély, így a végső modellben elhanyagolható.

Az adatfolyam kimenetele egy olyan táblázat, mely tartalmazza az egyes komponens anyagszintű árát és karbonlábnyomát, valamint az összeszerelési eljárásokat. Ezzel rendelkezésre áll minden adat a 3.5 gráf felrajzolásához.

3.3.3. össze- és szétszerelés kapcsolata

Az elkészített kimeneti táblázat tartalmazza a termékkel kapcsolatos fontos információkat. Az összeszerelési eljáráskokból adódó kötési technológiák oldását jellemző értékeket egy összeszétszerelési keresőtáblában tárolom. Összeszerelés megnevezését az össze- és szétszerelési keresőtáblába megkeresem és a szétszerelési eljárás jellemzőit kinyerve előkészítem az optimalizációs számításhoz szükséges számokat, vagyis

- eljárás ára euróban végrehajtandó műveletenként (pl.: csavarozás azonosítása esetén definiálunk egy fix értéket, az alkatrész befogását, majd hozzáadjuk a csavarozási műveletenkénti eljárás árát is),
- eljárás norma csoportjai,
- roncsolási index,
- szétszerelés típusa,
- szétszerelési eljárás neve.

A 2.3.4 fejezetben említett roncsolási indexet a Formentini és Ramanujan [20] alapján becsültem meg, százalékos értékben kifejezve. Például a csavarozásnál ha oldható állapotban van a kötés, akkor roncsolásmentesnek tekinthető a szétszedés, viszont hogyha rozsdás a csavar vagy nem férhető hozzá, akkor a felfúrásnál 20%-os roncsolással számoltam, ami azt jelenti, hogy az eredeti értéknek 80%-át veszem figyelembe.

Számítások pontosításához csoportosítottam a szétszerelési eljárásokat aszerint, hogy az oldási eljárás hogyan végezhető. A csoportok a következőek lesznek:

3.3. táblázat. össze- és szétszerelési keresőtábla.

Eljárás neve	Dizájn elem neve	Szétszerelési metódus	Kötési norma	Szerelési környezet norma	Képesítési szint norma	művelet ára	mértékegység	roncsolás	szétszerelési típus
csavarozás	csavarozás	kicsavarás	A	B	B	0,3+0,2*[cs]	EUR	0	CS
csavarozás	csavarozás	felfúrás	B	B	B	0,2+0,1*[cs]	EUR	10	CS
csavarozás	csavarozás	kontúr marás	C	B	C	0,3	EUR	20	SZ
csavarozás	csavarozás	szétvágás	C	B	C	0,2	EUR	40	SZ
csavarozás	csavarozás	bedarálás	C	B	A	0,1	EUR	90	RO
hidraulikus illesztés	illesztés	hidraulikus kinyomás	A	C	D	0,4	EUR	10	SZ
hidraulikus illesztés	illesztés	kontúr marás	B	B	C	0,3	EUR	20	SZ
hidraulikus illesztés	illesztés	szétvágás	B	B	C	0,2	EUR	40	SZ
hidraulikus illesztés	illesztés	bedarálás	C	C	A	0,1	EUR	90	RO
smd forrasztás	forrasztás	leforrasztás	A	C	B	0,3+0,1*[f]	EUR	0	NM
smd forrasztás	forrasztás	bedarálás	C	B	A	0,1	EUR	90	RO
diszpenzálás	diszpenzálás	levétel	C	B	A	0,1	EUR	10	RA

- többszörös oldási eljárás (csavarozások) ⟶ csoportos (CS) oldási csoport,
- leemelés vagy bepattanó kötés ⟶ szeparálás (SZ) csoport,
- leforrasztása elektronikai elemeknek ⟶ nagymenyiségű (NM) eltávolítás csoport,
- szigetelés vagy ragasztás ⟶ ragasztót tartalmazó eljárás esetén a ragasztó értéktelen lesz és a szétszerelési eljárás is nagyobb roncsolási indexet kap a felmerülő tisztítás miatt, ez lesz a ragasztás (RA) csoport,
- roncsolási eljárás ⟶ roncsolási csoport (RO).

A keresőtábla felépítése a 3.3 táblázatban látható. A művelet árak oszlopában a *cs* csavar darabszámot jelent, *f* pedig a forrasztásra szánt elemek számát.

3.4. Modellezés

A 3.2 fejezetben összegyűjtött adatforrásokat értelmezve, majd a 3.3 fejezetben előkészített adatokat táblázatba és keresőtáblákba rendezve, az adataim készen állnak a modellezésre és optimalizációs algoritmus fejlesztésére. Az optimalizáció eredményeként azt a megvalósítható optimális szétszerelési szekvencia meghatározása a cél, amelynek a legnagyobb lesz a 3.2 diagrammon értelmezhető visszanyerhető értéknek a szétszerelési árral képzett különbsége. Az optimalizációt megelőzően bemutatom, hogyan tanítottam az anyagcsoportosító LLM-et, és milyen pontossággal tudta megítélni az adott komponens anyagcsoportját. Mivel részben fenntarthatósági témakörben íródott a dolgozatom, így becslést teszek az LLM tanításának karbonlábnyomára is.

3.4.1. Modell választása anyagcsoportosításhoz

A 2.4.3 fejezetben bemutatott Transformer architektúrák közül tudtam választani Wolf[31] leírásának felhasználásával. Az egyes modellek Muennighoff és tsai.[39] teljesítményértékelése szerint sorba vannak rendezve, így könnyebben megtalálható a számomra megfelelő modellek a közül a legjobbnak ígérkezőket. A bemeneti adatok egyszerűségéből adódóan (egy vizsgált szekvencia hossza nem lépi át a 10 szót), elegendő volt a 100 millió paraméternél kevesebbel rendelkező modell, így az alábbiakra esett a döntésem:

- *GIST* modell [40] ,

- *Stella* modell, mely a Kirkpatrick és tsai. [41] cikkre hivatkozva lett kifejlesztve,
- *BGE* modell [42].

Mindegyikből létezik különböző paraméterszámú Nyelvi modell, az általam választottak: *Stella*: 55 millió ameddig a *GIST, BGE* 33 millió paraméteres, mivel ezek voltak a legkisebb és arányaiban legjobb eredményekkel rendelkező modellek.

3.4.1.1. Teljes Nyelvi modell tanítása

A Nyelvi modellek tanításának nagy számításigényét kielégítve az alábbi számítógép architektúrán futtattam a tanításokat:

- vCPU (virtual Central Processing Unit - virtuális központi feldolgozóegység) számítási egységeinek száma: 4, teljesítménye: 42 W,
- RAM (Random Access Memory - tetszőleges hozzáférésű memória): 28GiB
- GPU (Graphical Processing Unit - grafikus feldolgozóegység): Nvidia T4 (Tesla architektúra), 16 GB vRAM (a GPU számára elérhető RAM).

A tanítás hatékony futásának és karbonlábnyom minimalizálásának érdekében hatékonyságnövelő lehetőségeket kerestem. Wolf[31] oldala tartalmaz tanítási hatékonyságot növelő módszereket is, amelyek mind a lefoglalt *vRAM* területet optimalizálni, mind a tanítás sebességét képesek növelni. Ezek közül az alábbiakat építettem bele a megoldásba:

- batch méretek csökkentése,
- gradiens felhalmozás,
- gradiens ellenörző elhelyezése,
- változtatott lebegőpontos értékek használata (fp16, vagyis felezett pontosság használata),
- Loshchilov[43] féle `adam_bnb_8bit` optimalizációs módszer,
- Paszke és tsai.[44] által a `Pytorch` könyvtárba beépített `torch.compile` módszer.

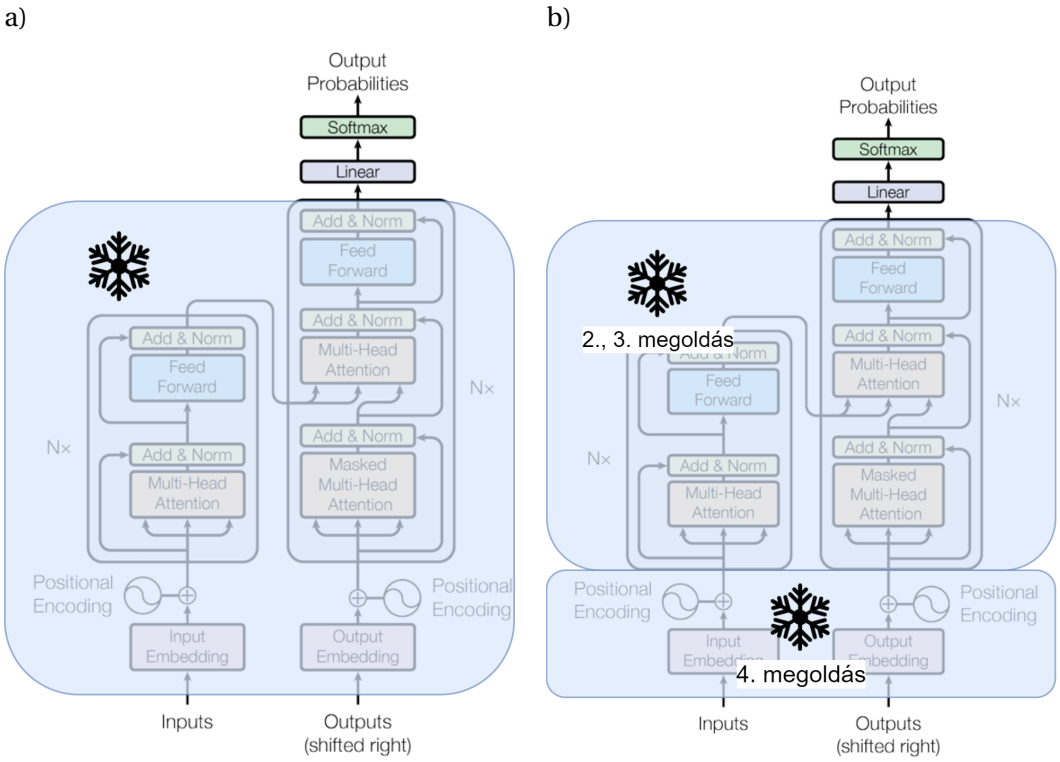
A feladat specifikusságát tekintve a tanítás hatékonyságának felülvizsgálását folytattam, melyet a következő fejezetben mutatok be.

3.4.1.2. Nyelvi modell részeinek fagyasztása

A rendelkezésemre álló adatok nem tartalmazták az összes felismerhető anyagcsoportot, így annak csak egy hányada került azonosításra. További probléma adatok címkéinek kiegyensúlyozatlansága, vagyis, hogy az egyes anyagcsoportokba nem került egyenlő mennyiségű adat. Ebből adódóan előnyös finomhangolni a Nyelvi modellt időnként. A tanítás hatékonyságának további növelésére, a Nyelvi modell egyes részeinek "lefagyasztásával", azaz adott rétegek gradiens-számításának elhanyagolásával kísérleteztem. Négy különböző megoldást vizsgáltam.

1. megoldás, az *beágyazó* és *figyelmimechanizmus* kódoló rétegek fagyasztása, ahogy a 3.7a) ábrán látható, rövidítése: K.
2. megoldás, az *beágyazó* rétegek feloldásával, mely a 3.7b) ábrán látható, rövidítése: KB.
3. megoldás, *beágyazó* és 1 db *Attention* réteg feloldása, rövidítése KBF.

4. megoldás, teljes *figyelemmechanizmus* és *klasszifikáló* réteg feloldása, beágyazó fagyasztása, ahogy a 3.7b) ábrán látható, rövidítése: KTF.



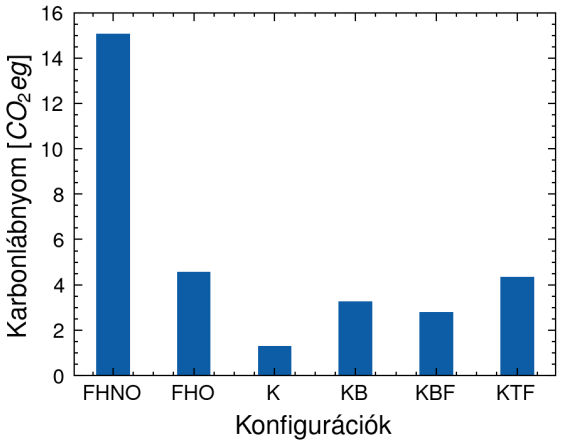
3.7. ábra. A Nyelvi modell architecktúra egyes részeinek fagyasztása, a) ábra csak a klasszifikáló réteget hagyja feloldva, b) esetben 2-4 megoldásoknak megfelelően kerülnek fagyasztásra az egyes rétegek.

A fagyasztásos megoldások pontosságra való hatásáról a 4.1 fejezetben számolok be. Kitérek rá, hogy mennyit javítottak az egyes rétegek feloldása, valamint különböző kiértékelési módszereket is ismertetek.

3.4.1.3. Tanítások karbonlábnyoma

Bouza, Bugeau és Lannelongue[45] cikkének leírás alapján választottam a tanítások karbonlábnyomának meghatározásához programozói könyvtárat. Számomra a legkézenfekvőbb könyvtár a Courty és tsai.[46] által publikált számítási módszer, melyet `codecarbon` `Python` könyvtárral lehet elérni. Az általam használt számítógép architektúra a *Microsoft Azure* szolgáltatásán található. A pontos karbonlábnyom kalkulációhoz elengedhetetlen az architektúra által felvett áram energia-mixének ismerete. Az energia-mix képet ad arról, hogy felvett egységnyi $[kWh]$ villamosáram milyen $[CO_2ekg]$ kibocsátásnak megfeletethető. A Courty és tsai.[46] által meghatározott számítások ezt országra lebontva tették elérhetővé. Az általam használt architektúra szerverének pontos elhelyezkedése ismeretlen, így internetes keresésem eredményei alapján, feltételezésem szerint a Magyarországhoz legközelebb eső szerveren futott a tanítás, mely Ausztriában található. A tanítás futása mellett a karbonlábnyom számláló $15[s]$-ként mérést végzett, mely a CPU, RAM és a GPU használatból számítva $0.0036[CO_2eg/s]$ kibocsátást határozott meg. Mivel ugyanazt a számítási egységet használtam minden modell és konfiguráció betanításához, így ez a szám közel állandónak mondható. Az egyes konfigurációk környezeti

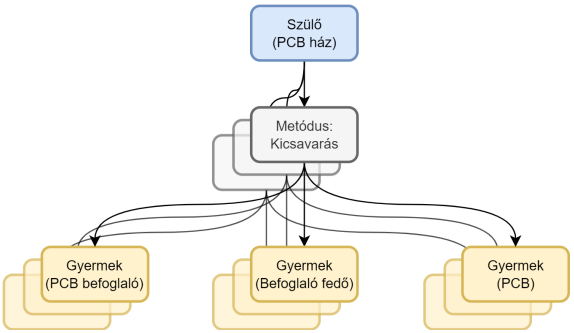
impaktja, a 3.8 ábra diagramján láthatóak, ahol a *Stella* modellt tanítva végeztem az elemzéseket. Az FHNO (finomhangolás optimalizáció nélkül) magasan kiugrik a többihez képest. Az optimalizációs finomhangolás (FHO) konfiguráció kb. harmadolta a karbonlábnyomát a tanításnak. Ehhez képest csak a klasszifikációs réteg tanítása szintén harmad akkora az FHO-hoz képest. A KB, KBF konfiguráció bár kisebb kibocsátást eredményeztek, de nagyjából kétszerese az értékük a K-hoz képest. A KTF konfiguráció közel megegyezik az FHO értékével. Az egyes konfigurációk tanítási pontosságra tett hátását a 4 fejezetben elemzem.



3.8. ábra. A tanítások karbonlábynomának konfigurációnkénti értéke.

3.4.2. PAC gráfok szétszerelési variánsokkal

A végleges elemzésre használatos gráf a 3.9 ábrán látható. Az optimalizációhoz szükséges összes adat hozzárendelhető a 3.6 ábra adatfolyama alapján. Az elhalványított belső részgráfok az egyes szétszerelési variánsokat tartalmazzák. Ezek segítenek, hogy figyelembe tudjunk venni több, különböző szétszerelési szekvenciát és ezek közül találjuk meg az optimálisat. Az így használatos gráfokat PAvC (Parent-Action and variants-Children, magyarul: Szülő-metódus és variánsai-gyermekek) gráf elnevezést kapta.



3.9. ábra. A teljes optimalizációhoz használatos PAvC gráf.

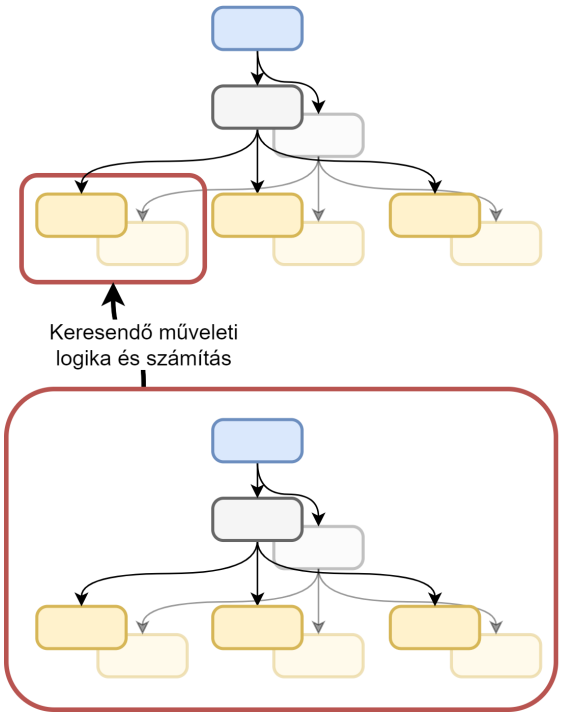
3.4.3. Optimalizációs algoritmus

Az alapvető gráfelemző algoritmusokkal nehéz lenne a 3.9 PAvC gráfot elemezni, mivel ebben a formában nem tartalmazza a ténylegesen megvalósítható eljárások sorrendjét. Két megoldási metódust fogok bemutatni.

1. Első, ahol a PAC fagráfot teljesen az aljától (legkisebb alkotó komponenstől kezdve) a tetejéig (kész termékig) megvizsgálom. Ezekből választom ki az optimálisat és megvalósíthatót minden szinten, az adott szint értékét elmentem. Így biztosítható, hogy a fentebbi alkatrészek teljes roncsolása esetén nem kerül számításba a gyermekek további bontása.

2. Második módszerben az összes lehetséges módszert kiszámítom és azoknak a konkrét értékeit sorba rendezem. Ez nem mindig biztosítható, hogy valódi értéket fog adni, hiszen az összes lehető szétszerelési szekvencia közül előfordulhat olyan is, ami a valóságban nem kivitelezhető.

Az elsőben a keresendő műveletet a 3.10 ábrán jelölt *tömörítési eljárás* fejezi ki, mely a teljes PAvC alfagráfot egy számba viszi át. Ez a szám lesz az optimális szétszerelési metódus a variánsok közül, mely tartalmazza a gyermekek anyagalapon kiszámított árának az eljárással vett különbségét és ez lesz a fentebbi szinti PAvC megfelelő gyermeke. A művelet megvalósításához szükségesek a 3.3.3 fejezetben bemutatott szétszerelési műveleti típusok, melyekkel biztosítható, hogy a képezett gráfon végzett számítások ténylegesen tükrözik a valóságot.



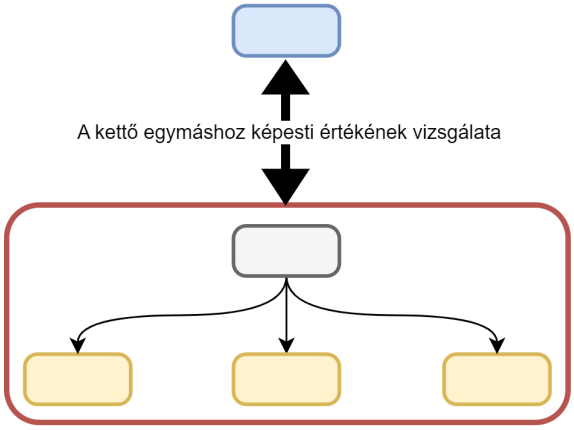
3.10. ábra. PAvC gráfok tömörítése szintről szintre.

Az optimalizáló algoritmus többcélúságát mutatja, hogy a kiszámított $[EUR]$ értékek mellett a CO_2ekg értékek is meghatározásra kerülnek. Mindkét érték maximalizálása a cél. A CO_2ekg maximalizálásának az elve, hogyha egységnyi tömegű alapanyag kerül felhasználásra, akkor az a lineáris gazdaságban a kibányászott érctől kezdődően sok átalakítás és eljárás útján kerül bele a termékbe. Azonban ez a 2.4 ábrához hasonlóan csökkenthető, hogyha újrahasznosított alapanyag kerül bele a termékbe.

3.4.3.1. Kényszerek a szétszerelési típusokban

A megvalósíthatósági kényszerek azonosításához és a PAC gráf 3.11 ábrán látható logika alapján kell döntést hozni. Számítások és az adott szint értéke ezekből fog adódni.

A szülő, mint komponens értékének meghatározása tovább bontás nélkül kettő lehetséges módon történhet:



3.11. ábra. Megvalósíthatósági kényszerek esetében vizsgálandó elemei a PAC gráfnak.

- újrahasználási értékként: bár a kész termék életciklusának végére ért, annak komponensei valamilyen más módon sokszor még felhasználhatóak, így az alkatrészpiacon akár eredeti formájukban is értéket képezhetnek,
- hogyha az adott komponens is életciklus végi alkatrész, akkor az anyagárát érdemes figyelembe venni.

Az összehasonlításhoz a bekeretezett AC algráfok összegzésének típusai és számításai a következő felsorolásban vannak részletezve, ahol a jelölések magyarázatát a 3.4 táblázat tartalmazza.

3.4. táblázat. A szétszerelési csoportok számításához tartozó jelölések.

Jelölés	Elnevezés
C_{tot}	adott AC ág összes gyermekek $[EUR]$ értéke
C_k	adott AC ág k-adik gyermekeinek $[EUR]$ értéke
R	roncsolási index [%]
A	adott AC ág szétszerelési metódusának $[EUR]$ értéke
AC_i	az i-edik AC ág optimális $[EUR]$ értéke
A_{fix}	AC ág szétszerelési metódusának komponens darabszámtól független $[EUR]$ értéke
A_{sep}	AC ág szétszerelési metódusának komponens darabszámtól függő $[EUR]$ értéke

1. *SZ* csoport logikája:

$$C_{tot} = (1 - R) \cdot \sum_{k=1}^{n} C_k \tag{3.1}$$

ahol n a gyermekek száma. Mivel a szeparálás egy egyszerű szétválasztási művelet, ami a dolgozat értelmezése szempontjából egy akár kézzel elvégezhető leválasztás, a számítási feltétel az alábbi lesz,

$$AC_i = \delta\{C_{tot} > \$_A\} \cdot (C_{tot} - A) \tag{3.2}$$

ahol $\delta\{C_{tot} > A\}$ egy indikátor függvény, melynek értéke 1, ha az argumentuma teljesül, 0 ha nem.

2. *RO* csoport logikája megegyezik a *SZ* csoportjával, annyi különbséggel, hogy *R* jelentősen nagyobb szokott lenni. Ezt a variánst a darálási eljárásokra alkalmazom, amikor a kimenet már nem lesz használható termék, hanem egy anyagmix, amelyből ki tudjuk nyerni valamilyen eljárással az értéket jelentő alapanyagot.

3. *RA* csoport esetében az alábbira változik a gyermek értékek összegzése:

$$C_{tot} = (1 - R) \cdot (\sum_{k=1}^{n} C_k - C_{ra}) \tag{3.3}$$

   ahol a C_{ra} a ragasztó/tömítő anyag értékét jelöli. Mivel ezt az általam vizsgált termékeknél csak destruktívan volt lehetőség eltávolítani, így nem kerül bele a végső számításba. $A_{C,i}$ kiszámítása megegyezik a 3.2 egyenletben végzett móddal.

4. *CS* csoport logikája: gyermek értékek meghatározása megegyezik a 3.1 egyenletben bemutatott számítással. Az újdonság, hogy felbontjuk a szétszerelési metódus egyszeri (befogás-kioldás) és többszörösen végrehajtandó feladatra, melynek EUR értékei ennek megfelelően: A_{fix}, A_{sep}.:

$$A_{tot} = A_{fix} + n_{sep} A_{sep} \tag{3.4}$$

   ahol n_{sep} a szeparálás végrehajtásához eltávolítandó kötő komponensek darabszáma (pl.: csavarok). Az AC ág összegzése innebtől megegyezik a 3.2 egyenletben leírtakkal.

5. *NM* csoport logikája: eltérés a sima *CS* csoporttal szemben, hogy melyek azok az alkatrészek, melyeket külön megéri leszerelni (pl.: PCB esetén a nagyobb integrált áramköröket hasznos lehet leszedni, azonban a kisebb ellenállások kis értéket képviselnek a folyamat végrehajtásához képest) és ezt össze kell vetni a A_{fix}-szel. Az egyenlet az alábbi lesz:

$$AC_i = -A_{fix} + (1 - R) \cdot \sum_{k=1}^{n} \delta\{C_k > A_{sep}\} \cdot C_k \tag{3.5}$$

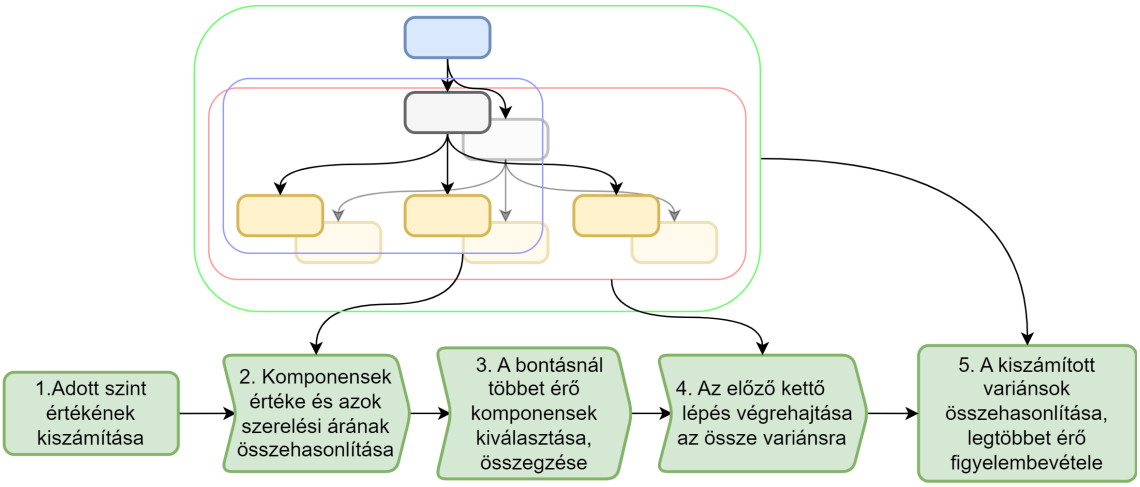
   ahol $\delta\{C_n > A_{sep}\}$ a már ismertetett indikátor függvény, ezúttal minden elemre külön kiszámítva.

A 3.12 ábra második és harmadik lépése foglalja magában a fent leírtakat. A negyedik és ötödik lépésben, egy adott összeszereléshez kapcsolható összes variáns közül az legnagyobb értékű kerül kiválasztásra. Ez az eljárás tömöríti a 3.10 ábrának megfelelően az optimális értékét a teljes gráf vizsgált ágának. Az eljárás következő lépése, hogy az adott PAvC szülő a következő szinten gyermek lesz, melynek értéke az optimális PAvC értékként értelmezhető. Végig iterálva minden szinten, kimenetként az optimális szétszerelési szekvenciát adja vissza az algoritmus a lokális maximumok megtalálásával.

A képezett lokális maximumok kiszámítása jelentősen csökkenti a számítási szükségletét az optimalizáció keresésnek, komplexitás összehasonlítására a 4.1 fejezetben mutatok be számításokat.

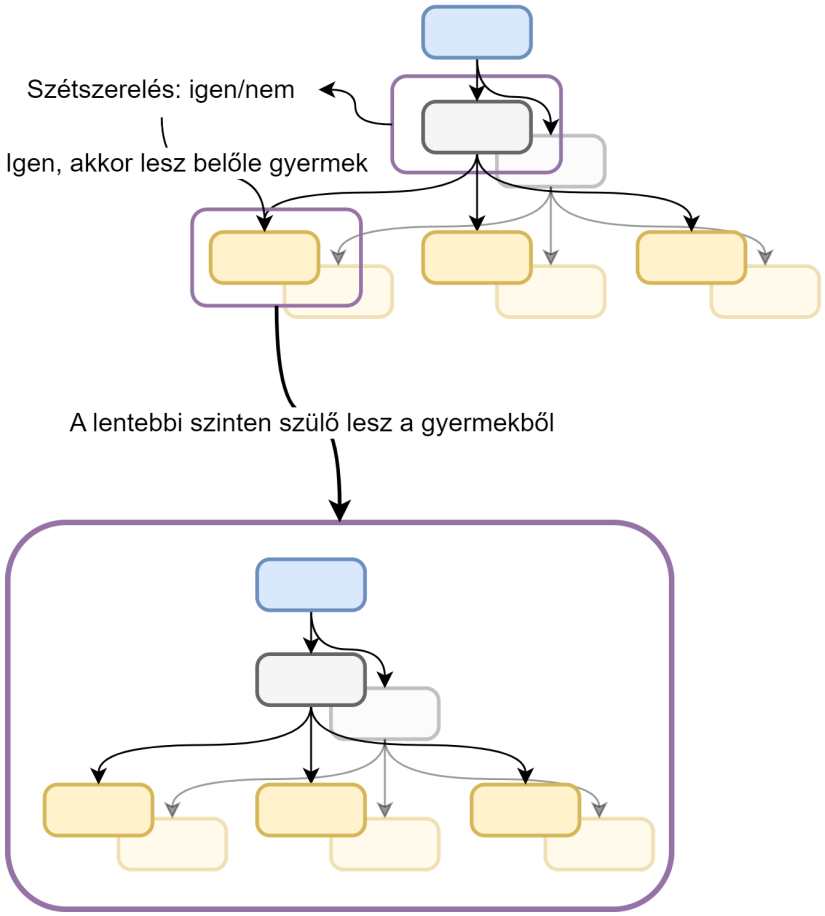
3.4.3.2. Összes variáns képzése

Az optimalizáció ellenőrzésére az egyszerűsített termék teljes PAvC gráfjának összes megoldását kiszámítom. Ehhez első lépésben képezni kellett minden létező szétszerelési eljárás kombinációt. Kombinációk képzésénél azzal a feltételezéssel éltem, hogy minden bontási eljárásnál ugyanazok a gyermekek jönnek létre, így a variánsok kombinálása volt a feladat. Az eljárások értéke egyesével a 3.4.3.1 fejezetben bemutatott típus alapú számításokkal kerül meghatározásra. Következő, hogy minden eljáráshoz hozzárendelek egy igen/nem indikátort mely szerint



3.12. ábra. Egy összeszerelési PAC gráf bontása PAvC gráffal.

azt az eljárást végrehajtásra kerül-e. Ha végrehajtásra kerül és lesznek újabb leszármazottak, akkor következő szinten szülő lesz a gyermekekből, ha nem kerül végrehajtásra, akkor annak a gyermeknek a roncsolási index szerinti értékét a végső számításnál veszem figyelembe. Az elméleti lépések vizualizációját a 3.13 ábra mutatja be. A leszármazási feltételek amelyeknek meg



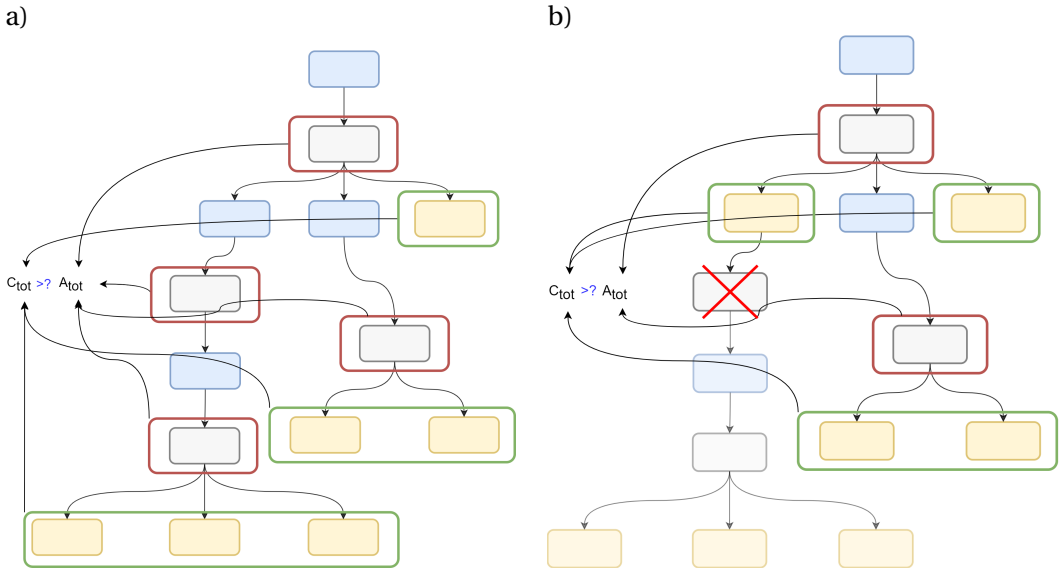
3.13. ábra. Fentről lefelé terjedő számítás lépései.

kell felelnie a gyermekeknek, hogy a következő lépésben szülő legyen belőlük:

1. kerüljön végrehajtásra a szétszerelés, így a következő szinten a szülői értéke a roncsolástól függő érték lesz,

2. a szétszerelési eljárás valódi (nem bedaráló) bontási metódus legyen.

A kimeneti érték számítását egy teljes PAC példagráfon ábrázolva, a 3.14a) ábra mutatja be az összegzést. A kiszámolt $[EUR]$ értékek rögzítésre kerülnek, a $[CO_2ekg/EUR]$ értékekkel együtt. A szétszerelési lépésekhez tartozó normák számszerűsített értékei: $A = 1$, $B = 2$, és így tovább. A számszerűsített értékek összegzése megadja, hogy egy generált szétszerelési szekvencia milyen bonyolultságú. Ha a normák összege magas számot eredményez, akkor az várhatóan egy bonyolultabb, komplexebb szerszámokat és szaktudást igénylő szétszerelés. A teljes PAC gráf módosul, hogyha egy adott szétszerelés meg nem valósulóként kerül rögzítésre, így a 3.14b) ábrán látható az összegzésre kerülő elemek száma.



3.14. ábra. Az összes szétszerelési szekvencia sematikus számítása. Az a) ábrán a fentről lefelé összegzésban a végső értékéket a $C_{tot} - A_{tot}$ adja meg. A b) ábrán a teljes PAC gráf módosulata és annak sematikus számítási elve, végre nem hajtott szétszerelés esetén.

Ezzel a módszerrel megmutatható a teljes megoldási tér, vagyis az összes olyan szétszerelési szekvencia, amely megfelel a valóságot tükröző kényszereknek. A 4.3 fejezet eredményei megmutatják ezek eloszlását, valamint példákat mutatok arra, milyen esetekben lehet érdemes szűkíteni, vagy szűrni ezt.

4. fejezet

Eredmények, kiértékelés

Ebben fejezetben bemutatom a 3.4 fejezetben összeállított LLM konfigurációk tanítását, a finomhangolt modell pontosságát, annak többféle módszerrel való értékelését. Továbbá bemutatom az optimalizációs algoritmus alkalmazását egy általánosított autoipari motorvezérlőn. Kitérek a heurisztikus optimalizációs algoritmus előnyeire és hogy mivel tudja csökkenteni a számítási igényt. Mindkét algoritmus futását követően bemutatom a kimeneti eredményeket, azokat összehasonlítom.

4.1. LLM kiértékelése

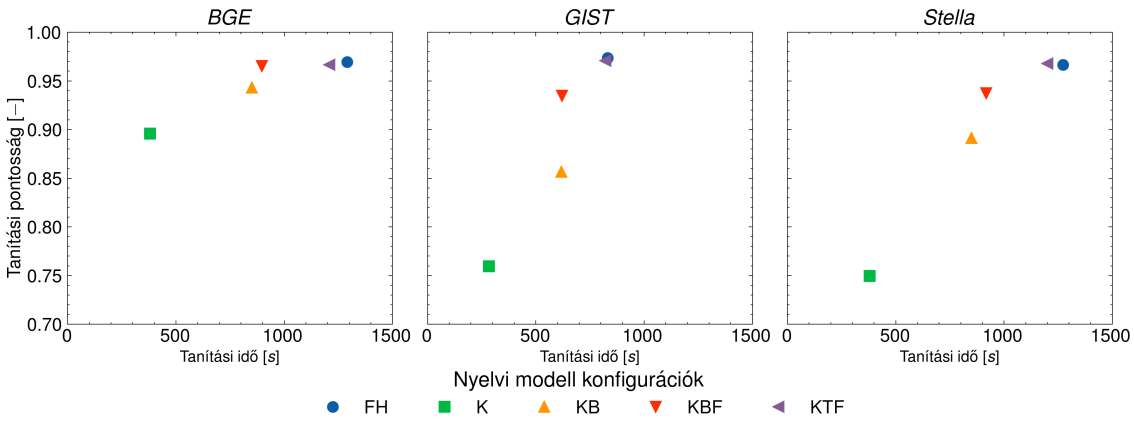
A fejezet a 3.4 fejezetben bemutaott modellek üzleti megértéssel való kapcsolatát elemzi. A modell eredménye a várt értéket adja, vagyis esetemben az LLM ténylegesen jól csoportosítja a komponenseket és ez statisztikai módszerekkel alá támaszthatóan jó az eredmény, akkor a modellválasztás megfelelt. A nyelvi modellek pontossága a ROC (Receiver Operating Characteristic - vevői működési jelleggörbe) vizsgálatával történik. Az ROC vizsgálati módszer az esetemben az LLM predikcióinak TPR (True Positive Rate - igaz pozitív arány) értékét hasonlítja össze az FPR (False Positive Rate - hamis pozitív arány) értékével. A ROC görbe alatti területet kiszámítva adódik metrika a klasszifikáció pontosságára. Összevonva AUROC-ként (Area Under Receiver Operating Characteristic - vevői működési jelleggörbe alatti terület) említem a későbbiekben.

4.1.1. LLM tanítás, pontosság

A 3.4.1 fejezetben összeállított tanítási konfigurációk futtatási eredményei a 4.1 ábrán láthatóak. A futattott tanítások a következőek, melyek már mind az optimalizált konfigurációval futottak, a három (*BGE, Stella, GIST*) modell esetében:

- teljes nyelvi modell finomhangolása (*FH*),
- rétegek fagyasztása, csak a klasszifikáló kimenetet feloldva (*K*),
- a beágyazó részeket is feloldva (*KB*),
- egy figyelemmechanizmus réteget feloldva (*KBF*),
- külön a beágyazó rétegek feloldása (*KTF*).

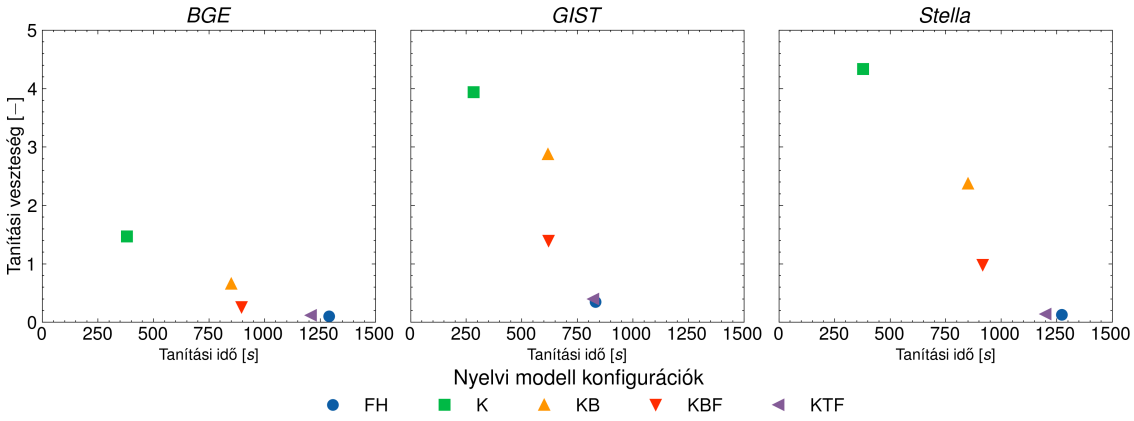
A diagramon látható eredmények mutatják, hogy a *BGE* architektúra különböző részeit lefagyasztva, *Stella*-hoz közel azonos tanítási idő mellett a legjobb pontosságot (`train_loss`) eredményezte. A *GIST* modell tanítása volt a leggyorsabb, pontossága közel megegyezik a *Stella*-val. A modellekről általánosságban elmondható, hogy a beágyazó rétegek a tanítási időt kétszerezik, azonban pontosságban is közel 6-10 százalékpontot javult ezekben az esetekben. Egy



4.1. ábra. LLM tanítási modellek és az ahhoz tartozó futtatási pontosságok.

figyelemmechanizmust tartalmazó réteg hozzáadása nem jelentett sokat időben, azonban még a *BGE* modell esetében is javított 1-2 százalékpontot.

A tanítási veszteségeket (`train_loss`) elemezve a 4.2 ábrán, hasonló kimenetek láthatóak. A *BGE* modell ebben az esetben is jobban teljesített a másik kettőhöz képest, következtetésképpen elmondható, hogy a gradiens fagyasztásra ez a modell a legkevésbé érzékeny. A *GIST* előnye a sebesség, melyben minden tanítási módszerhez képest jobban végzett. A *Stella* modell tanítása hosszabb volt és a pontossága csak a teljes nyelvi modell tanítása esetén közelíti a *BGE* értékeit. Arányokat tekintve hasonlóság figyelhető meg egy darab figyelemmechanizmus réteg gradiensének feloldása esetén, ez közel felére csökkentette a tanulási veszteséget. Csak klasszifikáló réteg esetén a veszteség jelentősen felugrik, a tanítási idő csökkenése mellett.



4.2. ábra. Tanítási veszteségek alakulása az egyes futtatások során.

A 4.1.1 fejezet eredményeit összegezve a fagyasztásos módszerek csökkentik a tanítási időt, azonban ez pontosság szempntjából kompromisszumokkal jár. Ennek enyhítésére tervezett szoftverkeretrendszerem alkalmazási bevezetése esetén az LLM anyagcsoportosító beépítését az alábbi szempontok szerint tanítom, a karbonlábnyom csökkentése érdekében:

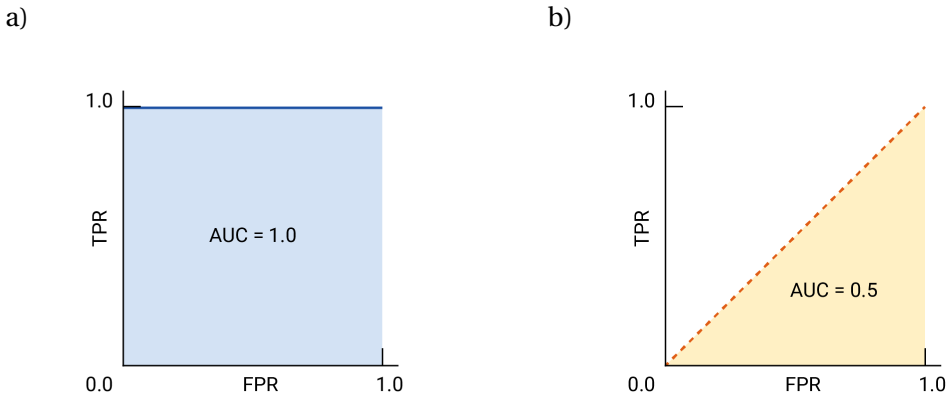
- *BGE* nyelvi modell használata nagyobb pontosságának köszönhetően,
- új adatok esetén az újratanítás:
  - ha új adatok jelennek meg, de nincs köztük új címke, akkor a klasszifikációs réteg tanítása is elegendő,

– ha új címke kerül azonosításra, előnyös finomhangolni a klasszifikációs réteg mellett a *beágyazó* és egy *figyelemmechanizmussal* rendelkező réteget, hogy a modell tudja értelmezni az új anyagcsoport megjelenését.

Ezzel enyhíthető a tanítási idő és pontosság közötti kompromisszum.

4.1.2. AUROC elemzések

Az AUROC elemzése eredetileg bináris klasszifikációk értékelésére használatosak és azoknál mutatnak jól értelmezhető metrikákat [47]. A görbe alatti érték kiszámításával lehet következtetéseket levonni a klasszifikáció sikerességének számszerűsítésére. Erre két példát hoz a 4.3 ábra, ahol az a) ábrán szereplő függvény elérése a cél és a b) ábra a véletlenszerűen klasszifikáló modell. Az általam vizsgált eset, egy többosztályos klasszifikáció, így a szokványos ROC AUC metrikák nem relevánsak, azok kiterjesztését Hand és Till[47] végezte el, melynek egy könnyedén a programba illeszthető implementációját a *Huggingface* [48] oldal tartalmazza.

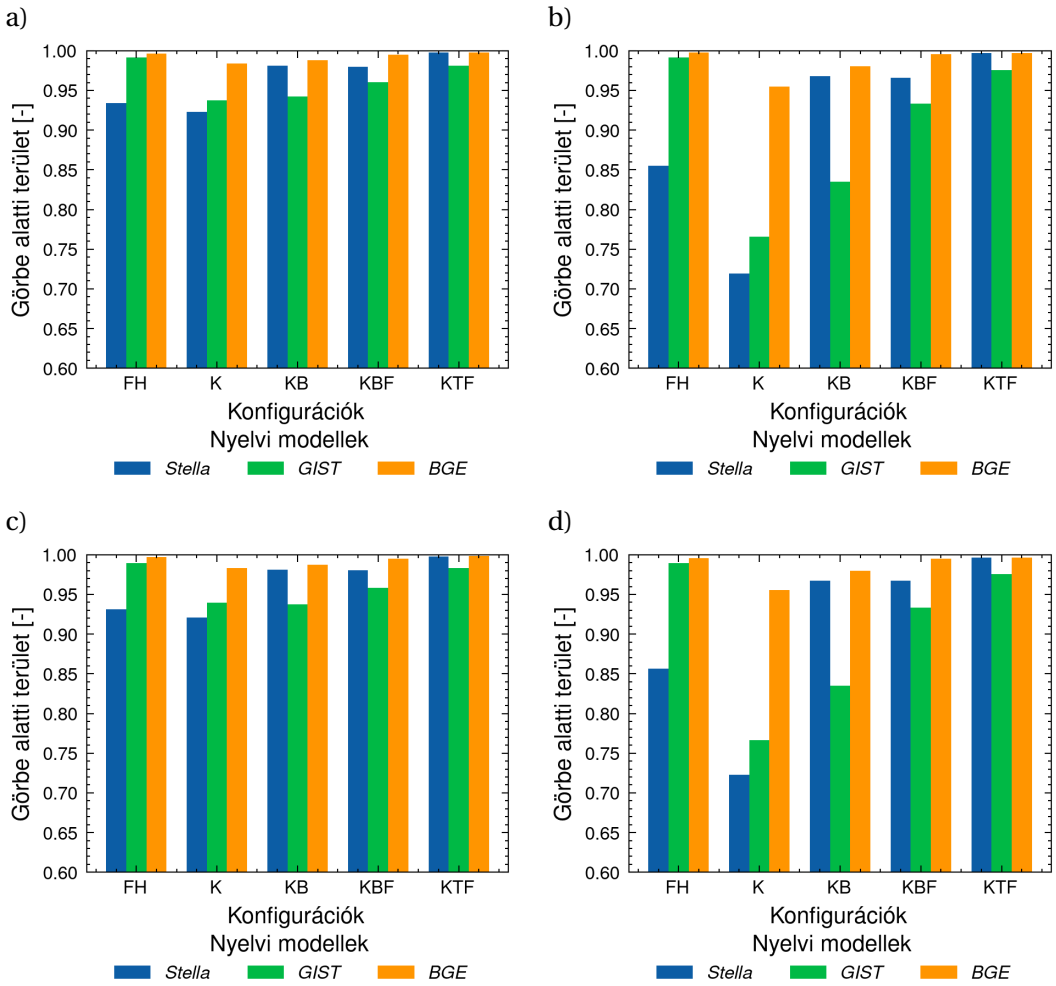


4.3. ábra. ROC AUC (Area Under the Curve - görbe alatti terület) szélsőséges esetei[49]. Egy tökéletes klasszifikációra példa az a) ábrán látható, míg egy teljesen véletlenszerűnek klasszifikáló a b) ábrán szerepel.

4.1.2.1. Többosztályos ROC görbe

A betanított nyelvi modelleket összegyűjtöttem, azokon egymást követően lefuttattam az ROC görbe felrajzolásához szükséges predikciókat. Ehhez véletlenszerű mintavételezést választottam az adatok közül. A modellek ezeket a véletlenszerűen választott komponens neveket határozták meg, az ROC alatti görbe pedig megadta, hogy milyen pontosságú volt a klasszifikáció. Az OvO (One-versus-One - egy-az-egyhez) megközelítés a többosztályos klasszifikációs problémát az egyes osztályok páronkénti másik osztállyal szembeni elemzésre osztja fel, így az egyes párok közötti klasszifikációt vizsgálja. Ezeknek az alapklasszifikálóknak a kimenetei kerülnek kombinálásra a kimenet meghatározására. Az OvR (One-versus-Rest - egy-a-többihez) vizsgáló módszer felosztja a problémát úgy, hogy minden predikcióra egy osztálynak a többi osztállyal szembeni predikcióját vizsgálja [47]. Az OvO és OvR vizsgálatok összegzésének további 2 lehetőség van: *mikro* és *makro* összegzés. A makro összegzés a külön kiszámított AUROC értékeket egymástól függetlenül összegzi az egyes kategóriákra és ezt követően átlagolja az értékeket. Előnye, hogy kevésbé érzékeny az adatok kiegyensúlyozatlanságára a mikrohoz képest. Mivel a számomra rendelkezésre álló adat nagy kiegyensúlyozatlanságú, ezért a makro lesz a mérvadó [50].

A 4.4 ábrán látható 4 diagram az egyes AUROC elemzési módszerek kimenetelét mutatja. A makro és mikro elemzések az elvártnak megfelelő eltéréseket mutatják, a mikro elemzések nagyobb eltéréseket mutatnak, amely az adatok osztály-kiegyensúlyozatlanságából következhetne. Azonban megfigyelve az egyes nyelvi modelleket csak a *Stella* és *GIST* mutattak érzékenységet a kiegyensúlyozatlanságra, míg a *BGE* így is képes volt 95% feletti értéket teljesíteni. Az OvO és OvR módszerek közötti különbség nem jelentős, szemmel nem észlelhető az eltérés. Összegezve a 4.4 ábra diagramjait, kijelenthető, hogy a *BGE* nyelvi modell pontosabban képes az osztályozási feladatom elvégzésére.



4.4. ábra. Az ábrák az egyes AUROC elemzéseket tartalmazzák, a) OvO makro-, b) OvO mikro-, c) OvR makro-, d) OvR mikro elemzések sorra.

A nyelvi modellek tanítását vizsgálva és kielemezve a finomhangolás pontosságának eredményét, kimondható, hogy a *BGE*, *GIST* és *Stella* közül számomra a kiemelkedő előnyökkel rendelkezik a *BGE* nyelvi modell.

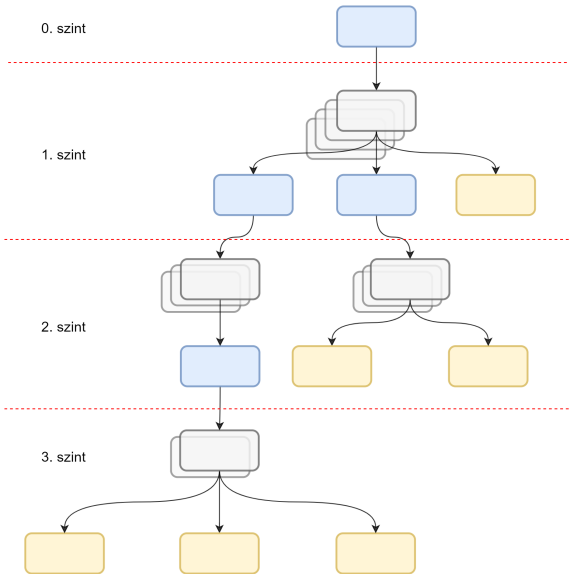
4.2. Optimalizáció eredményei

A két optimalizációs megoldás összehasonlításának egyik fő kritériuma azok időkomplexitása, mivel a 3.4.3.2 fejezetben kifejtett összes megoldás sorbarendezéséből is lehet következtetni az optimumra. Az összes lehetőség kiszámítása az egyszerűsített termék (3.1 táblázat) esetén

sok időt vett igénybe, míg az heurisztikus megoldás kiszámítása pillanatszerűen lefutott. Ennek matematikai összehasonlítására az egyes megoldások időkomplexitását mutatom be és vezetem le a 4.2.1 fejezetben. A heurisztikus módszer konkrét, célérték szerinti megoldásai a 4.2.2 fejezetben kerülnek bemutatásra. Az összes megoldás, vagyis a teljes megoldási tér eredményei 4.3 fejezetben kerülnek elemzésre.

4.2.1. Algoritmusok időkomplexitásának összehasonlítása

A 4.5 sematikus ábra bemutatja egy teoretikus terméknek minden lehetséges szétszerelési variánsát. Az összes szétszerelési szekvencia a variánsokból kombinációjából származtatható. Az ábra képe alapján: $4 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 = 72$, figyelembevéve a szétszerelés végrehajtásának bináris értelmezését, akkor az összes lehetőség ezzel 144-re változik. Belátható, hogy ebből a 144 lehetőségből jelentős mennyiség nem lesz végrehajtható, mivel így olyan esetek is szóba kerülnek, amikor kisebb szinten nincs szétszerelés, de ugyanazon az ágon haladva magasabb szinten már lenne szétszerelés. A leírt algoritmus ezt kiszűri, mivel végre nem hajtandó szétszerelésnél a gyermekek nem kerülnek rögzítésre leszármazottként, csak végpontként, mint a 3.14b) ábrán is, így az az ág "levágásra" kerül.



4.5. ábra. A teljes PAvC gráf felrajzolása egy teoretikus terméken.

Ezzel ellentétben a 3.4.3.1 fejezetben leírt, lokális optimum kereső módszer jelentős komplexitás csökkentésre képes. A 4.5 ábránál példáján kiszámítva: $4+3+3+2 = 12$ lehetőség adódik, mivel a lokális maximumokat rögzítve iterál az algoritmus a szinteken keresztül. A szerelés bináris értékét aszerint állítja, hogy melyik az előnyösebb: megtartani a szülőt és azt bedarálni/újrahasználási értéken értékesíteni vagy végrehajtani a szétszerelést és leszármaztatni a gyermekeket. A lentről felfele elvnek köszönhetően a meg nem érő szétszereléseknél a fagráf ága elvágásra kerül, így a szétszerelési szekvencia mindig megvalósítható lesz.

Egy program futási idejének fő befolyásoló tényezőjét az ordó jelölés adja meg [51]. Esetemben a számítási igény a fentebbi logika alapján a variánsok kombinációjának képzéséből adódik, hiszen attól függ, hogy hány darab számítást kell elvégeznie az optimalizációnak. Az összes lehetséges kombináció képzésének függvényét felülről korlátozza a kötések számának a maximális szétszerelési variánssal rendelkező összeszerelés szorzata. Hogyha N az összes kötés száma, M azon kötés szétszerelési variánsainak a száma, amely a legtöbb variánssal rendelkezik. Így elmondható, hogy a globális optimum kiszámításának időkomplexitása: $\mathcal{O}(N^M)$, vagyis polinomiális lesz. Míg a lokális maximumokból képezett optimum komplexitása a kötésen-

kénti variánsok összegének függvényében növekszik. Az ordó számítás összegzésre vonatkozó szabálya szerint, így az időkomplexitás: $\mathcal{O}(M)$, mely jelentősen csökkenti a számítási időt. Az egyszerűsített terméken való futtatás az alábbi időket adta:

- összes kombináció képzése esetén: 5120 darab variáción kellett végig iterálnia az algoritmusnak és számításokat végezni, így 112891$[ms]$ azaz kb. 2 perc volt, mire a számítások lefutottak,
- a lokális maximumokat vizsgálva: 51$[ms]$ a futási idő.

Az futási idők gyakorlatban is megmutatták, hogy a 3.4.3.1 fejezetben bemutatott heurisztikus optimalizáció skálázhatóbbá teszi a szoftverkeretrendszert és nagyobb termékek esetén is képes megadni gyorsan, akár pillanatszerűen megadni az optimális szétszerelési szekvenciát, valamint annak jellemzőit.

4.2.2. Optimális szétszerelési sorrend

A kiszámított optimális szétszerelési egy olyan szerelési sorrendet és eljárásokat leíró táblázat, mely a becsült legnagyobb anyagszintű megtérülést adja vissza az adott termék esetén. Ehhez kapcsolható a becsült karbonlábnyom csökkentés $[CO_2ekg/EUR]$ értékben. Az eredmények a 3.1 táblázat alapján, 3.2 táblázatban feltüntetett értékek szerint kerültek kiszámításra. Az optimalizációt két különböző célértékre futtattam le, becsült EUR és CO_2ekg megtérülésre. A két vizsgált eset eredménye 4.6 ábrán látható. A megjelölt optimumok jelentős eltérést jelentenek. Ennek oka, hogy jelentősen többre tehető a CO_2ekg megtérülés a bontás esetén mint EUR megtérülés, mivel a bontási folyamatok árban az anyagból számított megtérülések nagyságrendjébe esik. Azonban CO_2ekg/EUR esetén egy nagyságrenddel nagyobb számok fordulnak elő, így az optimalizálás kisebb tömeg esetén is a bontást fogja előnyösnek ítélni.

Az optimalizációs algoritmus sikeres futásának eredménye a 4.6a) ábrán látható, ahol a megtérülés jelentősen a pozitív irányú elmozdulást mutat. A megtérülésnek a belefektetett munkával vett különbsége számszerűsíti ezt az elmozdulást, melynek értéke a 4.1 egyenletben került kiszámításra. Ehhez az szétszerelési szekvenciához tartozó becsült karbonlábnyom csökkentés 20$[CO_2ekg]$-ra tehető.

$$B_{PAvC,opt} = C_{PAvC,tot} - A_{PAvC,tot} = 1.3078 - 0.4 = 0.9078[EUR] \tag{4.1}$$

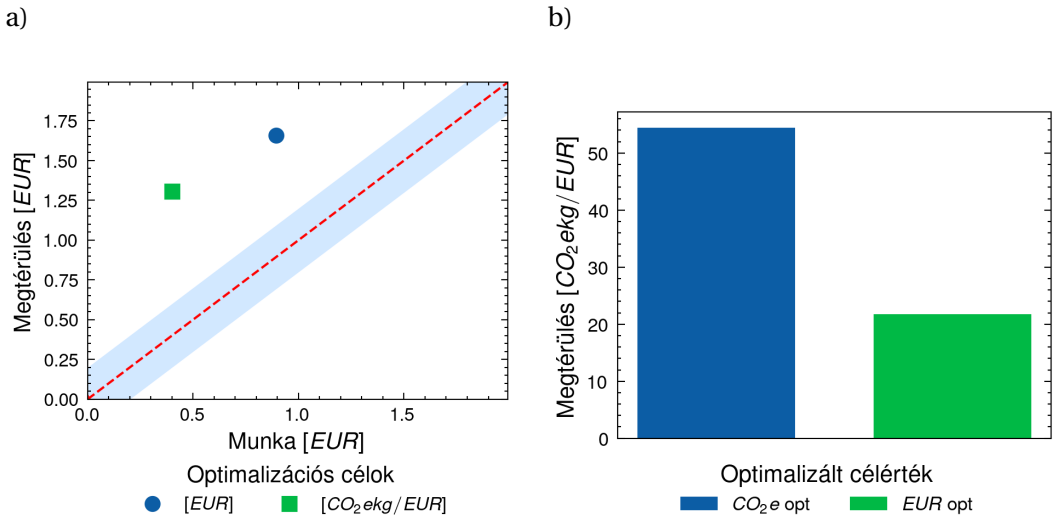
Ahol:

- $B_{PAvC,opt}$: a teljes PAvC gráf optimális értéke $[EUR]$-ban,
- $C_{PAvC,tot}$: a AvC gráf végződésein elhelyezkedő gyermekek értékei,
- $A_{PAvC,tot}$: a PAvC gráf elágazásainak, vagyis a végrehajtandó szétszerelések értéke $[EUR]$-ban.

A karbonlábnyomra optimalizált megoldás kb. +0.5$[EUR]$ növekedés mellett nagyobb szétszerelési munkát is eredményez, míg a becsült karbonlábnyom csökkentés a kétszeresére tehető, ahogy ezt a 4.6b) ábra diagramja is mutatja.

4.3. Megoldási tér

Ebben a fejezetben az egyszerűsített példatermék azon a szerelési megoldásainak a 3.4.3.2 fejezet szerinti számítási eredményei kerülnek bemutatásra, ahol a felírt szerelési szekvenciák megvalósíthatóak. A rendelkezésre álló adatokból a *Munka - Megtérülés* értékei megadhatóak, ezeket diagramon ábrázolom és elemzem a milyen megtérülési kilátása van az adott termék szétszerelésének.



4.6. ábra. Az két különböző célértékre optimalizált esetek eredményei. Az a) ábrán látható a várható költség megtérülés, míg a b) ábra a várható $[CO_2ekg]$ megtérüléseket mutatja.

4.3.1. Teljes megoldási tér

A teljes megoldási tér az összes kombinációra vonatkozó szétszerelési szekvenciát jelenti. A teljes tér vizsgálata képet ad arról, hogy mennyire változatos szétszerelési lehetőségei vannak akár már egy egyszerű terméknek is. A 4.7a) ábra diagramján minden jelölt ponthoz tartozik egy szerelési sorrend, mely végrehajtási munkájának becsült értéke a pont x koordinátája, míg a megtérülés becsült értéke az y koordináta lesz. A középső választó vonal és az annak a környezetét jelölő kék sáv egy határt képez. Ennek a határnak a pozitív y vagy negatív x irányába elmozdítva a termék szétszerelését, pozitív megtérülést eredményez a művelet. Az előbbi irányába való elmozdulási lehetőségek:

- magasabb felvásárlási értékű alapanyag használata,
- kisebb *roncsolási index*-szel rendelkező szétszerelési lépések alkalmazása,

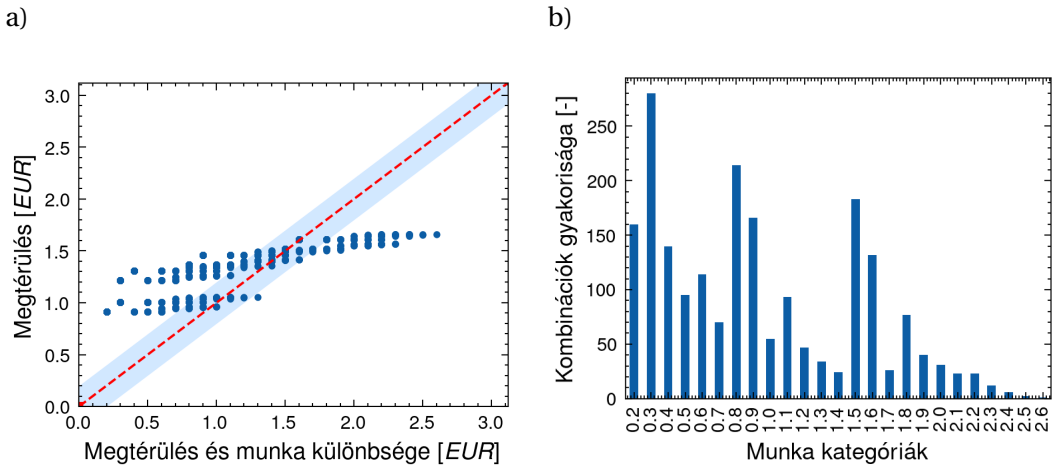
míg a negatív x irányba való elmozdítás:

- kevesebb szétszerelési lépés,
- olcsóbb szétszerelések alkalmazása,
- könnyen bontható kötések alkalmazása.

A fentiekből adódik, hogy egy termék fenntarthatósági viszonylatban életciklus előtt és után is vizsgálható. A tervezés során még lehetőség van változtatni az anyagon és megfelelő kötési technológiákat választani, azonban

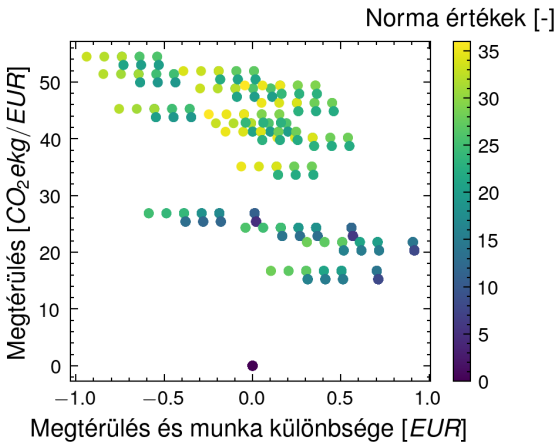
A pontok csoportosulása a munka szempontjából függőleges vonalakon helyezkedik el, ennek oka, hogy a termék viszonylag kevés szerelési lépésből áll össze, emiatt az egyes kombinációk azonos értéket fognak felvenni. Az eloszlások a 4.7b) ábráján látható. Az eloszlásból el lettek távolítva a $0[EUR]$ munka értékű lehetőségek, ugyanis a lehetőségek több mint felét ezek teszik ki, azonban az elemzés szempntjából nem tartalmaznak fontos információt.

A teljes megoldási megoldási térben érdemes vizsgálni az egyes karbonlábnyom megtérüléseket a B_{PAvC} értékeket függvényében, a 4.8 ábra diagramján, ahol a normák számszerűsített értéke színtérkép formájában van jelölve. A legnagyobb pozitív eltérések a diagram jobb



4.7. ábra. Teljes megoldási tér esetén számított szétszerelések. Az a) ábra diagramja mutatja a megtérülést a munka függvényében, míg a b) ábra diagramja a gyakorisági eloszlás értékeket mutatja munka kategóriák szerint.

oldalán található pontok, melyek színéből egyszerű szétszerelésre lehet következtetni. Ezek a szétszerelések csak egy-két szintet bontanak, azokat egyszerűbb eljárásokkal (pl.: csavarozás). Mivel a nagyobb tömegű alkatrészek, mint a *fedő*, a *PCB* és annak a *háza* már ezzel az első lépéssel kinyerésre kerül, így tömegből számított értékek már ezen a szinten is magasak lesznek. További bontási eljárás csak növeli munka költségét anélkül, hogy tényleges megtérülést eredményezne. A diagram tetején elhelyezkedő pontok a nagyobb karbonlábnyom csökentést eredményezik, azonban azok megvalósíthatósága is nehézkesebb a norma értékeikből kiindulva.



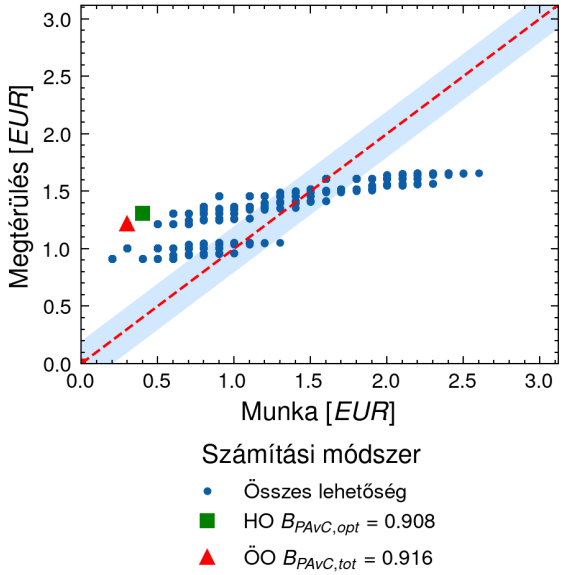
4.8. ábra. Karbonlábnyom megtérülés a B_{PAvC} függvényében, színtérképként pedig a normák számszerűsített értékei kerültek feltüntetésre.

4.3.1.1. Összes megoldás és optimalizált megoldás összehasonlítása

Összevetve, és egy diagramon ábrázolva az összes megoldást az optimalizációs módszerrel, látható, hogy a legjobb megtérülés értéke enyhe eltérést mutat az összes maximum megtérüléshez

képest. Azonban hogyha az idő komplexitásokat nézzük, a 4.2.1 fejezetben bizonyított jelentős számítási sebesség előnnyel rendelkezik a heurisztikus algoritmus.

Összehasonlítva a két kimeneteli lehetőséget a 4.9 ábra diagramján, látható, ahol a *HO* a heurisztikusan optimalizált pontot jelenti, míg az *ÖO* az összes kiszámított érték sorbarendezéséből adódó pontot tartalmazza. A diagramot elemezve elmondható, hogy a globális maximum és az heurisztikusan kiszámított maximum, közel esnek, értékük kevesebb mint 1%-ban tér el. Az összes lehetőséghez képest jelentősen a választó egyenes elönyösebb oldalán helyezkednek el.



4.9. ábra. Összes lehetőség összehasonlítása az optimális kimenetekkel.

A 4.9 ábra diagramjáról leolvasható, ahogy egyre több komponens kerül bontásra, növekszik a megtérülési érték, azonban az nem tart egyensúlyt a szétszerelési munka árával. Ideális esetben, minél több elem kerül oldásra, annál nagyobb a visszanyert érték is. Ahogy a példatermék diagramja is mutatja, ez a valóságban nem lesz igaz, hiszen minél kisebb alkatrészek kerülnek bontásra, azok megtérüléshez adott értéke (ha csak nem ér nagyságrendekkel többet) egyre csökkenő tendenciát mutat. A fenntarthatóságra tervezés elve, hogy a határvonal előnyös oldalára tehető szétszerelhetőséggel rendelkező termékek kerüljenek ki a gyárból, hiszen így gazdasági érdeket fog képviselni a termékek újrahasználása/javítása/újrahasznosítása megvalósuljon.

4.3.2. Megoldási tér szűkítése

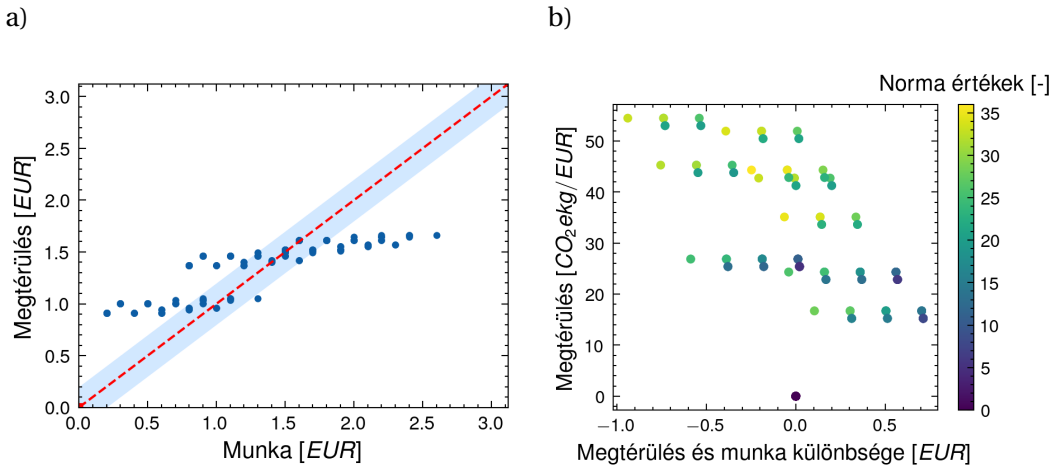
Az előzőekben bemutatott szétszerelési szekvencia tervezési módszer pontosítható attól függően, hogy milyen környezet áll rendelkezésre a szétszerelés elvégzésére. Ez segít bővíteni a felhasználási lehetőségeit a szoftverkeretrendszernek, mivel így az egyszerűbb bontóktól az újrahasznosításra specializálódott feldolgozó centrumokig terjedő technológia figyelembevehető az optimum eléréséhez. Az algoritmus futásának szempontjából ez a megoldási tér szűkítését jelenti, mivel így a variánsok száma fog csökkenni.

A szűrés két logika szerint történhet. Az egyik, hogy ismertek a szétszerelésre rendelkezésre álló eszközök és a termék életciklusa utáni kötések állapotuktól függően hogyan oldhatóak. A megoldáshoz a normák szűrése ajánlott, mivel így általánosíthatóbb és nincs szükség a konkrét szétszerelési környezet vizsgálatára. Ez tervezési fázisban előnyösebb, amikor még nem ismert

a konkrét LCA-ja a terméknek, az csak becsülhető, azonban a tervező már tudatosan körkörös megoldásokkal kívánja ellátni a terméket.

A másik szűrési logika előnyösebb már meglévő termékek konkrét szétszerelési környezetre vonatkoztatott vizsgálatára. Ekkor a technológiai szűrés javasolt, hiszen megfogható a konkrét termék és annak az állapota, azonban kérdéses, hogy milyen lehetőségek állnak rendelkezésre, ahol végrehajtható a kalkulált szétszerelési szekvencia. A két megoldás között van, amikor termékprotfólió analízisre van alkalmazva a szoftverkeretrendszer.

A 4.10b) és a 4.8 ábrák összehasonlításával emberi szemmel is érzékelhető, hogyna változott ugyanazon termék szétszerelési szekvenciáinak lehetősége kettővel kevesebb (*milling* (marás/kontúrmarás) és *scrapping* (bedarálás)) technológia figyelembevételével. Az a) ábra és a 4.7a) ábra diagramja között hasonlóság figyelhető meg a pontok eloszlásának tekintetében. A szemmel látható különbség számszerűsítve, hogy 5120 db-ról 384 db-ra csökkent az összes felismerhető szétszerelési szekvenciák száma.



4.10. ábra. A marás/kontúrmarás és bedarálás szétszerelési technológiák kivételére szűrt megoldási terek.

4.4. Alkalmazhatóságorientált eredmények

A tervezett szoftverkeretrendszert a Robert Bosch Kft.-ben már egy futó projekthez terveztem, ahol a cég a termékportfóliójának egy részét elemzi fenntarthatósági szempontból. A termékek adatait összegyűjtve és azok elemzéseként tudtam feltárni, hogy egy multinacionális cég esetében milyen adatok szükségesek, azok hol érhetőek el, hogy a szakirodalomban bemutatott módszerekkel körkörösségre vonatkozó kimutatásokat hozhassak létre. Ezek a kimutatások segítenek tudományos alapra helyezni az adott termék körkörösségi relevanciáját és rámutatnak, hogyan lehet gazdasági előnyt faragni a körkörösségből. A 4.8 ábra diagramján látható kb. $1[EUR]$ megtérülés kiterjesztve akár több-millió termékre számottevő hasznot jelenthet egy olyan folyamat eredményeként, amely segít zöldíteni az iparágat.

A bemutatott szoftverkeretrendszer modularitását mutatja annak többcélúsága, mellyel közvetlen kimutatások készíthetőek egy adott termék komponenseinek alapanyagként való újrahasznosítása esetén. Másik modularitási szempont, a kötések oldási technológiájának rugalmasabb kezelése, vagyis a szerelési variánsok számításba vétele, így segít a szétszerelő sorra szabni a várható megtérüléseket. A személyre szabottságnak köszönhetően növelhető a potenciális felhasználási lehetőségek száma, mely segíti a körkörös gazdaság térnyerését.

Az anyagcsoportosításra finomhangolt nyelvi modell segít csökkenteni a korábban manuálisan elvégzett munkát. A fentebb ismertetett eredmények alapján elmondható, hogy az álta-

lam finomhangolt nyelvi modell nagy pontossággal meghatározta egy-egy komponens elnevezéséből, hogy az milyen újrahasznosítási kategóriába tartozik, ezzel gyorsítva termékelemzési feladatokat.

5. fejezet

Összefoglalás

A kutatásomban olyan szoftverkeretrendszer fejlesztését mutattam be, mely képes elemezni termékek szétszerelési lehetőségeit és azt potenciális gazdasági megtérülésre és karbonlábnyom csökkentésre számszerűsítve elemezni. A termék alkatrészjegyzékét vizsgálva, a kötési technológiákkal kiegészítve a szoftverkeretrendszer optimalizációs algoritmusokkal és LLM-mel támogatott számításokkal képes megítélni egy, vagy igény esetén az összes ismert lehetséges szétszerelési szekvenciát. A kutatás első lépéseként szakirodalmi kutatást végeztem a releváns területeken. Bemutattam a körkörös gazdaság fontosságát, megoldásait és céljait, amelyek közelebb segíthetnek a fenntartható termékgyártáshoz. Ezután kielemeztem termékek szétszerelési szekvencia elemzésével kapcsolatos tudományos cikkeket, melyek segítettek megérteni, milyen megközelítések vannak jelenleg a tudományágban és milyen megoldásokat mutattak be. Ezeket a megoldásokat kiegészítve egy új, variánsokkal bővített PAC gráfot, a PAvC gráfot vezettem be, amely egy kötési technológiához több szétszerelési variánst is számításba vesz. Ennek előnye, hogy minden szétszerelési variáns más megvalósíthatósági környezetet feltételez, melyeket keresőtáblák összeállításával, normák és típusok bevezetésével, számszerű értékekké és számítási logikává alakítottam. Ezeket felhasználva írtam heurisztikus optimalizációs módszert, mely lokális maximumokat összegezve találja meg a legnagyobb megtérüléssel rendelkező optimális szétszerelési szekvenciát. Az eredményét összevetem egy olyan metódussal, amivel az összes szétszerelési variánst kiszámítom az egyes kötésekhez társítva, majd ezeket grafikonon ábrázolva kielemzem, hogy melyik eredményezett jobb megtérüléeseket. A szoftverkeretrendszer előnye, hogy modulárisan alkalmazhatóak rajta technológiai és norma szerinti szűrők is, amivel így szétszerelési környezetre szabható pontosabb szétszerelési szekvenciák képezhetőek.

Kutatásom másik újdonsága a hulladékcsoportosítás MI-vel támogatott megoldását teszi lehetővé. Az alkatrészjegyzékben szereplő komponenseknek a tömege adott, azonban azoknak pontos anyagtulajdonsága nem ismert. Ahhoz, hogy meg lehessen becsülni az újrahasznosítási értékét az adott komponensnek, ismerni kell, hogy milyen felvásárlási kategóriába sorolandó. Ehhez elemeztem a hulladékcsoportosításban alkalmazott MI megoldásokat, melyek képesek lehetnek klasszifikációs algoritmusok segítségével anyagcsoportosításra. Mivel ezek az algoritmusok képi feldolgozás segítségével csoportosították az anyagokat és azok nekem nem álltak rendelkezésemre a kutatásomhoz, ezért egy új megoldást kellett keresnem. A kihívás megoldására a napjainkban elterjedt LLM-ek alkalmazását választottam. Megismerkedtem a szakirodalmával és felhasználási módszereivel. Kiválasztottam 3 nyelvi modellt, amelyeket finomhangoltam, hogy komponens név alapján 33 anyagcsoportokba ossza az alkatrészeket, melyekhez így már potenciális tömegenkénti felvásárlási értéket tudtam kapcsolni. A dolgozatomban bemutattam, hogyan csökkentettem kilenced részére a nyelvi modellek finomhangolásának karbonlábnyomát különböző hatékonyságnövelő megoldások segítségével, a fenntartható adatfeldolgozás tekintetében. Elemeztem, hogy a gyorsabb tanítási módszerek mennyivel csökkentet-

ték a pontosságát az adott nyelvi modellnek. A pontosságot tanítás alatt és után is vizsgáltam. A szakirodalomban jegyzett AUROC módszer különböző típusainak segítségével következtetéseket vontam le a nyelvi modellek klasszifikáló képességeivel kapcsolatban. Vizsgáltam, hogy azoknak különböző tanítási hatékonyságot segítő konfigurációi milyen hatással voltak az AUROC elemzés eredményeire. Eredményként a *BGE* nyelvi modell szerepelt a legjobb hatékonysággal és a legjobb klasszifikációs eredményekkel. Dolgozatomban említést teszek arról, hogy egy alkalmazási bevezetés során hogyan lehetne hatékonyan frissíteni a klasszifikációs algoritmust és kiterjeszteni több anyagcsoport felismerésére.

A megoldásom limitációi:

- A geometriai tulajdonságok elhanyagolása segített általánosítani a szoftverkeretrendszer felhasználhatóságát, azonban ennek következtében a szétszerelési szekvenciák tartalmazhatnak pontatlanságot.
- Az anyagcsoportosító LLM jelenleg 33 anyagcsoportja nem fedi le kellően az újrahasznosítható anyagok csoportjait, ennek kiterjesztése szükséges.

Jövőbeni tervek a kutatásomra:

- adataugmentáció alkalmazása az anyagcsoportok pontosabb meghatározására,
- anyagcsoportosítás pontosítása, és kiterjesztése kontextus alapú csoportosításra, hogy az anyagok egymáshoz közelebb eső típusait az LLM is ismerje,
- költségsúlyozott AUROC elemzés, a potenciális félreklasszifikáció $[EUR]$-ban való kifejezésére,
- az alapanyag újrahasznosításon túl újrahasználási értékek figyelembevétele,
- roncsolási index kiterjesztése aggregálódó roncsolásokra,
- megtérülési és alapanyag potenciális karbonlábnyomcsökkentése esetén hulladékarány számítása.

Kutatásom főbb üzenetei:

- PAC gráfok variánsokkal kiegészített PAvC formájának elemzése hatékony módszernek bizonyult cégek termékportfólióinak elemzésére. A Formentini és Ramanujan[20] cikkében bemutatott metódusnak jól számszerűsített és oldási variánsokkal való kiegészítéseit tartalmazza a keresőtáblákban összefoglalt szerelési tulajdonságok.
- A fejlesztett heurisztikus optimalizációs algoritmus $\mathcal{O}(M)$ időkomplexitása a PAvC gráf összes létező megoldásának kiszámításának $\mathcal{O}(N^M)$ időkomplexitásához képest jelentős számítás-igény csökkentést mutatott. Ez a szoftverkeretrendszer skálázhatóságát biztosítja, hogy akár nagyobb, több komponensből álló termékek optimális szétszerelési szekvenciáját is pillanatok alatt kiszámítsa.
- A BGE nyelvi modell finomhangolásával az anyagcsoportosító LLM 90% feletti tanítás közbeni pontosságot eredményezett, a legkevésbé számításigényű konfigurációban is. Az AUROC elemzések megerősítették a BGE nyelvi modell használatának előnyösségét. Az anyagcsoportosítást elemző irodalmak 4 [28] és 13 [29] csoportba osztották be a hulladékot újrahasznosítási szempontból, amihez képest az általam bemutatott LLM 33 csoportba osztotta.

Köszönetnyilvánítás

A dolgozatom elkészítéséhez nagyban hozzájárult a Robert Bosch Kft. BEST (Bosch Engineering Scholarship Team – Bosch mérnöki ösztöndíjprogram csapata) programja, valamint az ipari digitalizációs („Data Team”) csapat, akik segítettek megismerni a céges infrastruktúra felépítését és használatát. Köszönöm a segítséget és támogatást konzulenseimnek, Dr. Szántó Mátyásnak és Magyar Gergelynek, akik számtalan szakmai tanácsot és formázási javaslatot adtak irányadásként, hogy dolgozatom a jelenlegi formában jelenjen meg és tartalommal rendelkezzen. Külön köszönettel tartozom a mentoromnak, Horváth Lászlónak, aki bevezetett a fenntarthatósági projektekbe.

Irodalomjegyzék

[1] Philip Peck és tsai. „Circular economy-sustainable materials management: a compendium by the International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE) at Lund University”. (2020).

[2] Abraham Zhang és tsai. „Multi-dimensional circular supply chain management: A comparative review of the state-of-the-art practices and research”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 155 (2021), 102509. old.

[3] Josep Peñuelas és Iolanda Filella. „Responses to a Warming World”. *Science* 294 (2001), 793 –795. old. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:263518485.

[4] Ralf Hannappel. „The impact of global warming on the automotive industry”. 2017. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134014474.

[5] Marcos Tavares Barderi és Maria Tereza Saraiva de Souza. „Application of circular economy principles in a automotive industry chain Aplicação dos princípios da economia circular numa cadeia da indústria automóvel Aplicación de los principios de la economía circular en una”. ().

[6] Luca Silvestri és tsai. „Circularity potential of rare earths for sustainable mobility: Recent developments, challenges and future prospects”. *Journal of Cleaner Production* 292 (2021), 126089. old. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126089. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621003097.

[7] Walter Leal Filho és tsai. „Understanding rare earth elements as critical raw materials”. *Sustainability* 15.3 (2023), 1919. old.

[8] Ben Jones, Robert J.R. Elliott és Viet Nguyen-Tien. „The EV revolution: The road ahead for critical raw materials demand”. *Applied Energy* 280 (2020), 115072. old. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115072. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920305845.

[9] Jaee Nikam. „Transformational change through a circular economy”. 2019. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:211441877.

[10] European Commission és Directorate-General for Environment. *2020 Circular Economy Action Plan – International aspects*. Publications Office of the European Union, 2020. DOI: doi/10.2779/085517.

[11] Walter R Stahel. „The circular economy”. *Nature* 531.7595 (2016), 435–438. old.

[12] Yicong Gao és tsai. „A data-driven method of selective disassembly planning at end-of-life under uncertainty”. *Journal of Intelligent Manufacturing* (2023), 1–21. old.

[13] Kannikar Khaw-ngern és tsai. „The 9Rs strategies for the circular economy 3.0”. *Psychol. Educ. J* 58 (2021), 1440–1446. old.

[14] Hayate Irie és Tetsuo Yamada. „Decision support model for economical material carbon recovery and reduction by connecting supplier and disassembly part selections”. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 14.2 (2020), JAMDSM0024–JAMDSM0024.

[15] Mehmet Ali Ilgin és Surendra M Gupta. „Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art”. *Journal of environmental management* 91.3 (2010), 563–591. old.

[16] Gulivindala Anil Kumar és tsai. „A multi-layered disassembly sequence planning method to support decision making in de-manufacturing”. *Sādhanā* 46.2 (2021), 102. old.

[17] Shana Smith, Li-Yen Hsu és Gregory C Smith. „Partial disassembly sequence planning based on cost-benefit analysis”. *Journal of Cleaner Production* 139 (2016), 729–739. old.

[18] Kento Igarashi és tsai. „Disassembly system modeling and design with parts selection for cost, recycling and CO2 saving rates using multi criteria optimization”. *Journal of Manufacturing Systems* 38 (2016), 151–164. old.

[19] S Harivardhini, K Murali Krishna és Amaresh Chakrabarti. „An Integrated Framework for supporting decision making during early design stages on end-of-life disassembly”. *Journal of Cleaner Production* 168 (2017), 558–574. old.

[20] Giovanni Formentini és Devarajan Ramanujan. „Design for circular disassembly: Evaluating the impacts of product end-of-life status on circularity through the parent-action-child model”. *Journal of Cleaner Production* 405 (2023), 137009. old. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137009. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623011678.

[21] Giovanni Formentini, Nuria Boix Rodriguez és Claudio Favi. „Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120.7 (2022), 4307–4334. old.

[22] Abla Chaouni Benabdellah és tsai. „A systematic review of design for X techniques from 1980 to 2018: concepts, applications, and perspectives”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102 (2019), 3473–3502. old.

[23] Fei Wang és tsai. „A novel disassembly sequence planning method based on spatial constraint matrices”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 124.9 (2023), 3001–3010. old.

[24] B González és B Adenso-Díaz*. „A bill of materials-based approach for end-of-life decision making in design for the environment”. *International Journal of Production Research* 43.10 (2005), 2071–2099. old.

[25] Francesco De Fazio és tsai. „The Disassembly Map: A new method to enhance design for product repairability”. *Journal of Cleaner Production* 320 (2021), 128552. old.

[26] Amal Allagui és tsai. „Reinforcement learning for disassembly sequence planning optimization”. *Computers in Industry* 151 (2023), 103992. old.

[27] Meng-Lun Lee és tsai. „Robot-assisted disassembly sequence planning with real-time human motion prediction”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 53.1 (2022), 438–450. old.

[28] Sergio Luis Nañez Alonso és tsai. „Digitalization, circular economy and environmental sustainability: The application of Artificial Intelligence in the efficient self-management of waste”. *Sustainability* 13.4 (2021), 2092. old.

[29] Henning Wilts és tsai. „Artificial intelligence in the sorting of municipal waste as an enabler of the circular economy”. *Resources* 10.4 (2021), 28. old.

[30] A Vaswani. „Attention is all you need”. *Advances in Neural Information Processing Systems* (2017).

[31] T Wolf. „Huggingface's transformers: State-of-the-art natural language processing”. *arXiv preprint arXiv:1910.03771* (2019).

[32] Rüdiger Wirth és Jochen Hipp. „CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining”. *Proceedings of the 4th international conference on the practical applications of knowledge discovery and data mining*. 1. köt. Manchester. 2000, 29–39. old.

[33] *General Methods for the Assessment of the Ability to Repair, Reuse and Upgrade Energy-related Products*. Techn. jel. 2020. okt.

[34] MOHU Zrt. *MÉH Telepi Átvételi Díjak*. Accessed: 2024-11-03. 2024. URL: https://mohu.hu/file/documents/0/0302/meh_telep_2024_marc.pdf.

[35] Prognos. *Alloy Steel - Price Index*. Accessed: 2024-11-03. URL: https://prognos.se/en/alloy-steel/.

[36] Plastic Portal. *Price Reports - 2020, Week 47*. Accessed: 2024-11-03. URL: https://www.plasticportal.eu/en/cenove-reporty?year=2020&week=47.

[37] Boardsort. *Current Payout Rates for E-waste and Metals*. Accessed: 2024-11-03. URL: https://boardsort.com/payout.php.

[38] Climatiq. *Climatiq - API for Carbon Footprint Calculations*. Accessed: 2024-11-03. URL: https://www.climatiq.io/.

[39] Niklas Muennighoff és tsai. „MTEB: Massive text embedding benchmark”. *arXiv preprint arXiv:2210.07316* (2022).

[40] Aivin V. Solatorio. „GISTEmbed: Guided In-sample Selection of Training Negatives for Text Embedding Fine-tuning”. *arXiv preprint arXiv:2402.16829* (2024). arXiv: 2402.16829 [cs.LG]. URL: https://arxiv.org/abs/2402.16829.

[41] James Kirkpatrick és tsai. „Overcoming catastrophic forgetting in neural networks”. *Proceedings of the national academy of sciences* 114.13 (2017), 3521–3526. old.

[42] Shitao Xiao és tsai. *C-Pack: Packaged Resources To Advance General Chinese Embedding*. 2023. arXiv: 2309.07597 [cs.CL].

[43] I Loshchilov. „Decoupled weight decay regularization”. *arXiv preprint arXiv:1711.05101* (2017).

[44] Adam Paszke és tsai. „Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library”. *Advances in neural information processing systems* 32 (2019).

[45] Lucía Bouza, Aurélie Bugeau és Loïc Lannelongue. „How to estimate carbon footprint when training deep learning models? A guide and review”. *Environmental Research Communications* 5.11 (2023. nov.), 115014. old. ISSN: 2515-7620. DOI: 10.1088/2515-7620/acf81b. URL: http://dx.doi.org/10.1088/2515-7620/acf81b.

[46] Benoit Courty és tsai. *mlco2/codecarbon: v2.4.1*. v2.4.1. verzió. 2024. máj. DOI: 10.5281/zenodo.11171501. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.11171501.

[47] David J. Hand és Robert J. Till. „A Simple Generalisation of the Area Under the ROC Curve for Multiple Class Classification Problems”. *Mach. Learn.* 45.2 (2001), 171–186. ISSN: 0885-6125. DOI: 10.1023/A:1010920819831. URL: https://doi.org/10.1023/A:1010920819831.

[48] Hugging Face. *ROC AUC Metric on Hugging Face*. Accessed: 2024-11-03. URL: https://huggingface.co/spaces/evaluate-metric/roc_auc.

[49] Google Developers. *ROC and AUC - Machine Learning Crash Course*. Accessed: 2024-11-03. URL: https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/roc-and-auc.

[50] Katarina Gašperlin Stepančič és tsai. „A novel explainable machine learning-based healthy ageing scale". *BMC Medical Informatics and Decision Making* 24 (2024), 317. old.

[51] Christos H Papadimitriou. „Computational complexity". *Encyclopedia of computer science*. John Wiley és Sons Ltd., 2003, 260–265. old.