

Kollaboratív robotok összehasonlító elemzése

Comparative analysis of collaborative robots

BURI Z.^{1,2}

¹University of Debrecen, Faculty of Engineering, Department of Engineering Management and Enterprise, buri.zsolt@eng.unideb.hu

²University of Debrecen, Károly Ihrig Doctoral School of Management and Business

Absztrakt. Az alábbi tanulmány négy, az iparban elterjedt robotkar összehasonlítását mutatja be abból a szempontból, hogy melyik a legalkalmasabb egy általános feladat elvégzésére. Az összehasonlító esettanulmány a következő gyártók robotkarjait veszi figyelembe: ABB, Kuka, Universal Robots, Techman Robot. Az összehasonlítás kritériumait a fontossági tényező és a tapasztalatok alapján határoztuk meg. Ezután a kritériumokat az Analytical Hierarchy Process (AHP) módszer segítségével rangsoroltuk. A négy alternatíva közötti sorrendet a Kesselring módszer segítségével állítottuk fel. A vizsgálat egy kiválasztási módszert mutat be az ipari robotok területén azok technikai paramétereinek segítségével.

Abstract. The following paper compares four robot arms in the industry to determine which model is the most suitable to perform a general task. The comparative case study considers robotic arms from the following manufacturers: ABB, Kuka, Universal Robots and Techman Robot. The criteria for comparison are based on the essential factor and experience. The criteria were then ranked using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. The order among the four alternatives was established using the Kesselring method. The study presents a selection method in industrial robots from the perspective of technical parameters.

Kulcsszavak: Ipari automatizáció, Robotizáció, Kesselring módszer, AHP módszer, Ipar 4.0

Keywords: Industry automation, Robotization, Kesselring method, AHP method, Industry 4.0

Bevezetés

Az Ipar 4.0 célja, hogy a jövő gyáraiban az eszközök kollaboratív módon tudjanak együtt dolgozni az emberekkel. Korábban az ipari automatizálási eszközöket és folyamatokat biztonsági okokból elkülönítették a munkásoktól, viszont az Ipar 4.0 egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy a jövő gyárait segítse a hatékonyság növelésében azáltal, hogy ez az elkülönítés megszűnik. Az ipari automatizálás ilyen módú alkalmazásai révén olyan tömegtermelés érhető el, ahol magas a hatékonyság és megismételhetőség [1]. Egyelőre azonban hiányzik a megfelelő rugalmasság a munkaterületeken a tömeges kollaboratívitás okozta bizonytalanságok kezelésére. Az ember képes lehet kezelni az ilyen ingadozásokat egyes helyzetekben, de korlátozzák fizikai képességei, mint az ismétlések pontossága, a fizikai erő, az állóképesség, és a sebesség. Ezek a korlátok gyakran csökkentik a hatékonyságot és a

minőséget, ezért az automatizálás és a rugalmasság megfelelő kombinációjának kialakítása egy gyártásban elengedhetetlen ahhoz, hogy a tömeges testreszabás során elérjük ezeket az átfogó gyártási célokat. Ez a cél elősegíti az automatizálás és a kézi munka előnyeinek integrálására irányuló kutatásokat. Ezek a kutatások az ember-robot együttműködésben (Human Robot Collaboration - HRC) csúcsonyosodott ki, egy ígéretes robotikai tudományágban, amely arra összpontosít, hogy lehetővé tegye a robotok és az emberek közös feladatainak elvégzését. A HRC olyan alkalmazási helyzeteket ír le, amelyekben egy robot, általában egy együttműködő robot (kobot) és egy ember osztoznak egy munkaterületen, és együttműködnek a feladatokban [2]. A kollaboratív robotika legújabb fejlesztései oda vezetnek, hogy a robotokat az emberi dolgozók közvetlen közelében lévő összeszerelő sorokba integrálják, megosztva a munkaterületet és a feladatokat [3]. A HRC bevezetése az összeszerelő sorokba azonban kihívást jelenthet. A humán elem kiiktatása a gyártásból, amint azt az iparági szakértők állítják, nem járható út [4].

Az ipari robotok közelebbi vizsgálata kulcsfontosságú a kollaboratív robotok megértéséhez, amelyek hatékonyabban értelmezhetők az ipari robotok kontextusában. Az ipari robot alapvetően egy önvezérelt eszköz, amely összetett műveletek sorozatát képes végrehajtani elektronikus, elektromos vagy mechanikus alkatrészei segítségével. Az ipari robot egy nagy, nehéz, merev karosszéria, amelyet olyan munkák elvégzésére használnak, amelyek nagyon nehézkesek és veszélyesek lennének az emberek számára, például hatalmas terhek szállítására a gyárakon keresztül. Általános szabály, hogy az ipari robotokat meghatározott alkalmazásokra tervezték, el vannak szigetelve az emberektől, és saját munkaterületük van [5].

Ezzel szemben a kollaboratív robotokat úgy tervezték, hogy az emberrel együttműködjenek, ugyanazon a munkaterületen osztoznak, mint a munkatársaik, ezért kobotoknak nevezik őket. A hatalmas ipari robotokhoz képest ezek a kis robotok sokkal könnyebbek, így sokkal jobban mozgathatók a gyárban vagy az iparban. Az ipari robotokkal szemben a kobotok másik előnye a rugalmasságuk. Mivel ezek a robotok rendkívül rugalmasak, egyetlen kobot számos feladatra használható, ezáltal lehetővé téve alkalmazásukat számos iparágban [6]. Ezenkívül könnyen programozhatók, és nagyszerű számítási képességekkel rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik számukra, hogy biztonságosan és hatékonyan dolgozzanak együtt az emberekkel. A tanulmány célja, hogy egy olyan módszertant adjunk, amely a robotkarokat a technikai paramétereik alapján hasonlítja össze.

1. Módszerek és anyagok

1.1. Módszerek

1.1.1. Analytical Hierarchy Process (AHP) módszer

Az Analytical Hierarchy Process (AHP), magyarul Analitikus Hierarchia Vizsgálat egy nagyon elterjedt, páros összehasonlításra alapuló módszer, amely alkalmas komplex rendszerek összehasonlítására és multikritériumos döntéstámogató problémák megoldására [7].

A multikritériumos, azaz többszemponútú döntési feladatok lényege, hogy a rendelkezésre álló lehetőségek közül az adott feltételeknek legjobban megfelelőt válassza ki és értékelje, rangsorolja azokat. Hatásos módszer összetett döntéshozatal kezelésére, segítséget nyújthat a vezetőség részére a

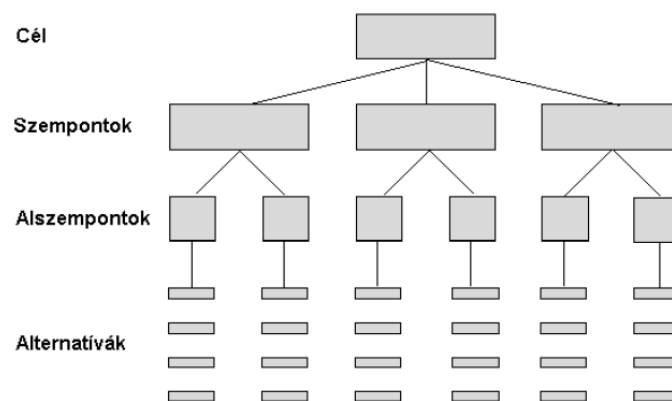
fontossági sorrend felállításában. Thomas L. Saaty fejlesztette ki, amely egy szisztematikus módszer egy probléma összetevőinek hierarchikus szemléltetésére [8]. Lényege, hogy a problémát egyre kisebb részekre osztja fel, majd páronkénti összehasonlító ítéletek sorozatán fejezi ki hierarchia elemeinek a relatív súlyát [8].

A módszer három részre oszlik:

- a végső cél vagy a megoldandó probléma,
- az összes elképzelhető megoldás (úgynevezett alternatíva),
- valamint az alternatívák értékelésének kritériumai [9].

Az AHP módszer eredménye nem ír elő egy legjobb megoldást, hanem támogatja a döntéshozókat annak meghatározásában, hogy melyik alternatíva felel meg a legjobban céljaiknak és a probléma megértésének. Átfogó és racionális keretet ad egy döntési probléma kidolgozásához, különböző összetevőinek megfogalmazásához és számszerűsítéséhez, nagyobb célokhoz való kapcsolásához, valamint az életképes megoldások értékeléséhez [9].

Használatához, elsőként meg kell határozni a döntési feladat felépítését, amely a cél meghatározásából, alternatívák és a szükséges szempontok kiválasztásából tevődik össze. Ahogyan azt az 1. ábra is mutatja, a többszintű struktúra legtetején áll a cél, alatta a szempontok és az alternatívák [10].



1. ábra: AHP modell felépítése [10]

Másodszor, mivel nem minden szempontot tudunk ugyanolyan módszerrel mérni/értékelni, ezért nagyon fontos a skálázhatóság, mivel így egységesen tudjuk értékelni a különböző alternatívákat. Az összehasonlításokat mátrixba rendezve értékelik, ahol a főátló feletti cellákat kell kitölteni. A főátló mentén az adott szempont önmagával lesz összehasonlítva, ezért annak értéke minden esetben 1 lesz.

A módszertan a következő:

1. egyformán fontos,
3. mérsékelten fontos,
5. sokkal fontosabb,
7. nagyon sokkal fontosabb,
9. rendkívül fontos [12].

A páros összehasonlítás-mátrix mérésére be kell vezetni a CI konzisztencia-indexet

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (1)$$

ahol λ_{max} az összehasonlítás-mátrix legnagyobb sajátértéke és n a sorainak száma. Minden n esetre konzisztencia-index átlagos értékeit véletlenszerűen generált páros összehasonlítás-mátrixokkal adhatjuk meg, amit RI-vel jelölünk. Így, a következőképpen számíthatjuk ki a konzisztencia-hányadost (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (2)$$

ahol az RI értékeket az alábbi táblázat adja meg:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

1. táblázat: Véletlenszerű index (RI) értékei a sorok számához viszonyítva (n) [11]

Az összehasonlítás akkor lesz elfogadható, ha a CR értéke 0,1-től kisebb lesz.

A módszer előnyei:

- Nem múltbeli, hanem a jövőre vonatkozó adatokra alapoz,
- A hierarchikus felépítése miatt a véleményeket össze tudja foglalni a kapott eredményekből,
- Van lehetőség érzékenységvizsgálat elkészítésére, amely megadja, hogy milyen faktorokra érzékeny az eredmény,
- Szubjektív kritériumok precíz súlyozását végzi el a páros összehasonlítás miatt [8].

Hátrányai:

- A válaszadónak fontos szerepe van, tisztában kell lennie a releváns tényezőkkel, irányelvekkel és kritériumokkal,
- Túl sok alternatívánál már nem kapunk pontos eredményt,
- Egyértelműnek kell lenni a kritériumoknak és alternatíváknak [8].

1.1.2. Kesselring módszer

Mivel az emberek képessége az információ feldolgozására korlátozott, ezért az értékelést minden kritérium esetében külön kell elvégezni. Fritz Kesselring volt az első, aki 1953-ban alkalmazta a termék-összehasonlítási megközelítést [11]. Alkalmazásával különböző, de valamilyen arány- vagy intervallumskálán mérhető műszaki paraméterek hasonlíthatók össze egymással, ezáltal lehetővé téve komplex rendszerek elemzését. Mivel egymástól eltérő mértékegységekkel rendelkeznek az egyes paraméterek, ezért fontos a mértékegységek közös nevezőre hozása. Minden egyes tényezőhöz meg kell határoznunk egy-egy ideálisnak vélt értéket. Ez az adott jellemzőknél az „ideális” termék legjobb paraméterértéke lesz, amelyek a 0-4-ig terjedő skálán a legmagasabb, azaz 4-es értéket kapják. Ezt követően a többi értéket az „ideálishoz” hasonlítja, és ehhez mérten kapják meg az értéket az alábbiak szerint (p_i):

- Különösen jó: (azaz eléri az ideális szintet) 4 pont
- Jó: (megközelíti az ideális szintet) 3 pont
- Kielégítő: (közepes elégti ki az ideális szintet) 2 pont
- Elfogadható: (még éppen megfelel a paraméter) 1 pont
- Nem fogadható el: (az alsó küszöbértéket sem éri el) 0 pont [11], [12].

A pontozást követően a kapott értékeket egy táblázatba összefoglalja, majd számítással állapítja meg a paraméterek műszaki értékét. Ezekből egy átlagérték adható meg, amely a paraméter potenciális helyzetének mutatószáma, valamint a rangsorban elfoglalt helyét adja meg. Ennek hátránya az, hogy az átlagolás következtében a középértéket felvevőké teljesen megegyezik a két szélsőértéket felvevő kritériummal. Emellett a szórás mérőszámát is figyelembe kell venni, ha reális rangsort szeretnénk felállítani. Emiatt egy súlyozó tényezőt (v_i) kell bevezetni a módszer alkalmazása során, a pontosabb eredmény érdekében. Ennek bevezetésével egy 2-10 között terjedő skálán vehetnek fel értékeket az eltérő sajátosságtól függően az egyes paraméterek. A korrigált műszaki értéket (X') ezáltal így lehet kiszámítani:

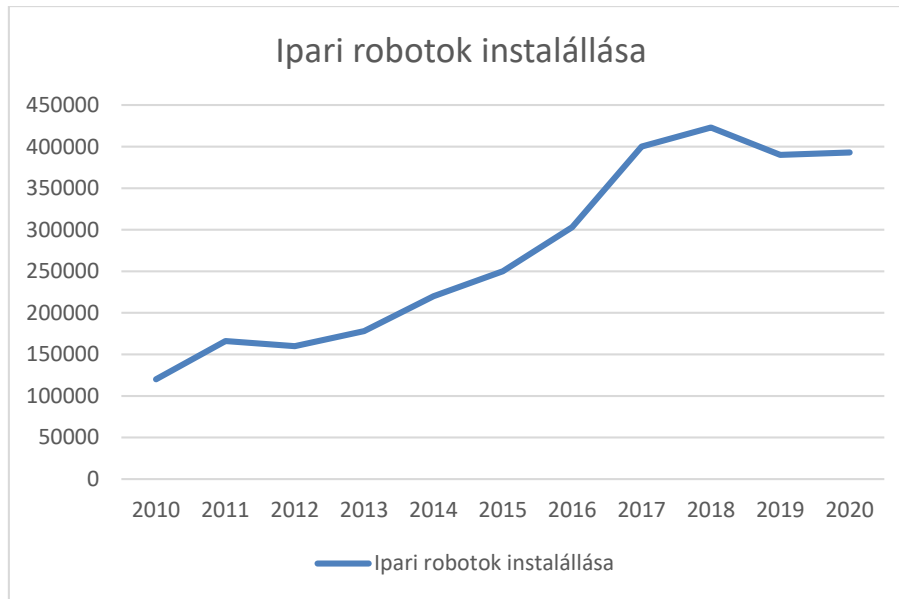
$$X' = \frac{\sum p_i * v_i}{\sum p_{i \max} * v_i} \quad (3)$$

X' relatív és abszolút rangsorolást is lehetővé tesz, maximális értéke 1 [11], [12].

1.2. Anyagok

1.2.1. Robotok kiválasztásának szempontjai

Az ipari robotok térhódítása az elmúlt évtizedben jelentős mértékben növekedett meg ahogyan azt a 2. ábra is mutatja. Ez nagyban köszönhető annak, hogy ezek sokkal könnyebben elérhetőek az egyes cégek számára, az áruk és üzemeltetési költségük jelentősen csökkent, míg ezzel szemben a termelékenységük növekedett. A robotokat nem csak az autóiparban használják nap mint nap, hanem az előállítás más területein is. Alkalmazhatóak az élelmiszeriparban, a gyógyszeriparban, anyagmozgatásra, használják távvezérelt formában az atomiparban radioaktív hulladékok kezelésére, minőségellenőrzési feladatok elvégzésére, manapság a robotsebészetben is végeznek velük műtéteket. Egyszóval, szinte mindenhol jelen vannak és a tevékenységtől függően alakíthatóak ki, programozhatóak és működtethetőek. Mára több tucat cég foglalkozik a robotkarok gyártásával, értékesítésével és szervizelésével (2. ábra).



2. ábra: Ipari robotok piaca a világban (db) [13]

A robotkarok kiválasztása a leglényegesebb szempont a további vizsgálatban, ezért olyan, napjainkban a piacon is elérhető berendezéseket kell választani, amelyek relevánsak a vizsgálat elvégzése szempontjából. A robotkarok későbbi kiválasztása az alábbi szempontok figyelembevételével történt:

- **Ár:**
Alacsony kezdeti költséggel rendelkezzen, amely pár éven belül megtérülhet. Napjainkban ez a leginkább döntő érv egy beruházás mellett vagy ellen.
- **Maximum teherbírás:**
A legtöbb felhasználás során néhány kilogramm mozgatása szükséges a kobotok számára. Alapvető esetben ez az érték a 2 ujjas megfogó változatra értendő. A megfogók igen széles körben rendelkezésre állnak, léteznek vákuumos, több ujjas, illetve mágneses kivitelek is.
- **Vezérelt tengelyek száma:**
A vezérelhető tengelyek száma meghatározza a kobot mozgástartományát, az egyik legalabvetőbb kritérium.
- **Maximum karkinyúlás:**
A gyártók minden esetben megadják ezt az értéket. Ez az a maximális távolság, amelyre a robotkar képes mozogni a középpontjához képest.
- **Pozíció ismételhetség:**
Ezt minden gyártó megadja a termékei specifikációjában. Megmutatja, hogy egy adott pozíciót milyen pontosan tud megismételni a robotkar. A pontosság miatt került fel a listára.
- **Súly:**
A robot súlya.
- **Lábméret:**
A robot lábának átmérője.
- **Biztonság:**

IP védelmi szint.

- Mozgási sebesség:

A kiválasztásnál fontos volt, hogy ne legyenek nagy különbségek mozgási sebességek között. Ezért azt vettem figyelembe, hogy a mozgási sebességek 0,75-1,25 m/s között legyenek, ugyanis általában ettől nincs szükség nagyobb sebességre.

- Energiafogyasztás:

Az egyes berendezések energiafogyasztása olyan szempont, amelyet a kiválasztásnál is figyelembe kell venni.

1.2.1. Kiválasztott robotkarok

Jelen munkában négy különböző gyártótól származó, kobotot használtunk összehasonlításra. Mindegyik hat-hét tengelyes, hasznos teherbírásuk 4-7 kg, hatótávolságuk 800-950 mm. A következő kobotok kerültek kiválasztásra, elsősorban tapasztalti úton:

- Universal Robots UR5e (3. ábra)



3. ábra: Universal Robot UR5e [14]

- KUKA LBR IIWA 7 (4. ábra)



4. ábra: KUKA LBR IIWA 7 [15]

- ABB GoFa CRB 15000 (5. ábra)



5. ábra: ABB GoFa CRB 15000 [16]

- Techman Robot TM5-900 (6. ábra)



6. ábra: Techman Robot TM5-900 [17]

A négy kiválasztott kobothoz a meghatározott kritériumok összegyűjtése az interneten elérhető adatlapok alapján történt. Ahol többféle ár is elérhető, ott a hivatalos gyártótól származó adatokat vettük figyelembe. A 2. táblázatban összefoglaltuk a kiválasztott eszközök adatait egy mátrix segítségével.

Kritérium	Universal Robots UR5e	KUKA LBR IIWA 7	Techman Robot TM5-900	ABB GoFa CRB 15000
Ár	28,750 €	62,500 €	27,000 €	31,500 €
Max. teherbírás	5 kg	7 kg	4 kg	5 kg
Vezérelt tengelyek száma	6	7	6	6
Maximum karkinyúlás	850 mm	800 mm	900 mm	950 mm
Pozíció ismételhetség	0.1 – 0.03 mm	+/-0.1 mm	+/- 0.05 mm	+/- 0.05 mm
Súly	20.6 kg	23 kg	22.6 kg	27 kg
Lábméret	149 mm	136 mm	152 mm	165 mm
Biztonság	IP54	IP54	IP54	IP54
Mozgási sebesség	1000 mm/s	1500 mm/s	1400 mm/s	2200 mm/s

2. táblázat: 4 kiválasztott kobot összehasonlító mátrixa a meghatározott kritériumok alapján – saját szerkesztés [14,15,16,17]

2. Eredmények

2.1. AHP módszer alkalmazása

A módszert az előző fejezetben meghatározott robotkarokra fogjuk elvégezni, abból a szempontból, hogy egy általános egyetemi oktatás során melyik robotkar lenne a legmegfelelőbb választás.

Az AHP módszer lépései:

- Objektív súlyok vektor létrehozása
- Szenárió pontszámok mátrixának kiszámítása
- Szenáriók rangsorolása
- A konzisztencia vizsgálatának ellenőrzése

Ennek eredményeként a leglényegesebb szempontok alapján 1, 3, 5, 7 és 9 pontos skálán hasonlítja össze a kritériumokat. Amint az alábbi 3. táblázatban látható, az ár/ár közötti érték 1-et kapott, mert mindkettő egyformán lényeges. Az ár sokkal fontosabb (9) az eszköz súlyánál. A maximális teherbírás jóval fontosabb (7) a lábnyomnál. A hasznos teher mérsékelten fontosabb (3) a kobot súlyánál. A köztes szignifikancia értékek közé tartozik az 1/3, 1/5, 1/7 és 1/9. A kritériumok pontozása után az összes oszlopot összeadjuk, hogy megkapjuk az egyes oszlopok összértékét.

	Ár	Max. teherbírás	Vezérelt tengelyek száma	Max. kinyúlás	Pozíció ism.	Súly	Láb	Biztonság	Mozgási sebesség
Ár	1	3	3	3	5	7	7	9	1
Max. teherbírás	1/3	1	3	1	1	5	5	5	1
Vezérelt tengelyek száma	1/3	1/3	1	3	1	7	7	5	1/3
Max. kinyúlás	1/3	1	1/3	1	5	7	5	7	1/3
Pozíció ism.	1/5	1	1	1/5	1	3	3	5	1/5
Súly	1/7	1/5	1/7	1/7	1/3	1	3	1/3	1/5
Láb	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1/3	1	1/3	1/7
Biztonság	1/9	1/5	1/5	1/7	1/5	3	3	1	1/5
Mozgási sebesség	1	1	3	3	5	5	7	5	1
SZUM	3 3/5	5 5/6	11 5/6	11 2/3	18 7/8	38 1/3	41	37 2/3	4 2/5

3. táblázat: AHP módszer – saját szerkesztés

Fontos, hogy ez a táblázat kitöltése mindig szubjektív, nagyban függ a táblázatot létrehozó tapasztalatától és véleményétől. Ahogy korábban is említettük nincs egy jó megoldás, a döntéstámogatást segíti elő az AHP módszer.

Az összeg alapján a súlyozási tényező kiszámítható a mátrix saját vektorának megkeresésével.

Ezt követően egy konzisztencia tesztet kell végezni, amely a hipotézisvizsgálat elvégzésére szolgál, és amely tesztet minden egyes kritériumon el kell végezni. Ehhez minden kritériumot elosztunk az azonos csoportba tartozó oszlopok összegével a következetesség biztosítása érdekében.

Példa:

$$\text{Ár oszlop} = 1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + 1 = 3 \frac{3}{5} \quad (4)$$

1. Konzisztenciavizsgálat kiszámítása a következőképpen történik:

$$(\text{Ár} \times \text{ÁrSZUM}) = \frac{1}{3 \frac{3}{5}} = 0,278 \quad (5)$$

2. Konzisztenciavizsgálat (Max. teherbírás/ÁrSZUM) = 0,093

Az egyes kritériumok normalizált értékét ugyanazzal a képlettel számítottuk ki, amelyet a teljes táblázatra alkalmaztunk. Az eredményeket a 4. táblázat tartalmazza. Az összes táblázatot az Excelben a megfelelő képletek segítségével hoztuk létre.

	Ár	Max teher	Vezérelt tengelyek száma	Max. nyúlás	Pozíció ism.	Súly	Láb	Bizt.	Mozgási sebesség	Wi
Ár	0,278	0,378	0,254	0,257	0,265	0,183	0,171	0,239	0,227	0,25
Max. teherbírás	0,093	0,126	0,254	0,086	0,053	0,130	0,122	0,133	0,227	0,14
Vezérelt tengelyek száma	0,093	0,042	0,085	0,257	0,053	0,183	0,171	0,133	0,076	0,12
Max. kinyúlás	0,093	0,126	0,028	0,086	0,265	0,183	0,122	0,186	0,076	0,13
Pozíció ism.	0,056	0,126	0,085	0,017	0,053	0,078	0,073	0,133	0,045	0,07
Súly	0,040	0,025	0,012	0,012	0,018	0,026	0,073	0,009	0,045	0,03
Láb	0,040	0,025	0,012	0,017	0,018	0,009	0,024	0,009	0,032	0,02

Biztonság	0,031	0,025	0,017	0,012	0,011	0,078	0,073	0,027	0,045	0,04
Mozgási sebesség	0,278	0,126	0,254	0,257	0,265	0,130	0,171	0,133	0,227	0,20

4. táblázat: Konzisztenciavizsgálat – saját szerkesztés

A W_i fontossági súlyértékeket úgy kapjuk meg, hogy a sorok átlagát vesszük.

Példa:

$$\bar{A}_r = \frac{0,093 + 0,042 + 0,085 + 0,257 + 0,053 + 0,183 + 0,171 + 0,133 + 0,076}{9} = 0,12 \quad (6)$$

Továbbá, ha összeadjuk a W_i oszlopot pontosan 1-et kell kapnunk.

Ellenőrzés:

$$W_i = 0,25 + 0,14 + 0,12 + 0,13 + 0,07 + 0,03 + 0,02 + 0,04 + 0,20 = 1 \quad (7)$$

A W_i fontossági súlyérték oszlop alapján felállíthatunk egy rangsort (5. táblázat).

	W_i	Rangsor
Ár	0,25	1
Max. teherbírás	0,14	3
Vezérelt tengelyek száma	0,12	5
Max. kinyúlás	0,13	4
Pozíció ism.	0,07	6
Súly	0,03	8
Láb	0,02	9
Biztonság	0,04	7
Mozgási sebesség	0,20	2

5. táblázat: Fontossági súly alapján létrehozott rangsor – saját szerkesztés

Az 5. táblázatból leolvasható, hogy a legfontosabb kritérium az ár, a második legfontosabb a mozgási sebesség stb., a legkevésbé fontos pedig a lábméret.

2.1. Kesselring módszer alkalmazása

A Kesselring módszer segítségével az egyes kobotok teljesítményének meghatározása végezhető el különféle paraméterek alapján, a módszert hat lépésben végeztük el.

1. lépés: Célfüggvény és súlykritériumok megadása

A célfüggvény alapvetően lehet minimalizálási, maximalizálási vagy egy értékhez közelítő. Míg az árat, a súlyt és a kobot lábának méretét minimalizálni szeretnénk, addig a teherbírás, a tengelyek számát, a robotkar kinyúlásának mértékét, a pozíciópontosságot, a biztonságot, valamint a mozgási sebességet maximalizálni szeretnénk (6. táblázat). A súlyértéket az előzőekben elvégzett AHP módszerből hoztuk tovább.

#	Kritérium	Célfüggvény	Súlyérték
1	Ár	MIN	0,25
2	Max. teherbírás	MAX	0,14
3	Vezérelt tengelyek száma	MAX	0,12
4	Max. kinyúlás	MAX	0,13
5	Pozíció ism.	MAX	0,07
6	Súly	MIN	0,03
7	Láb	MIN	0,02
8	Biztonság	MAX	0,04
9	Mozgási sebesség	MAX	0,20

6. táblázat: Célfüggvények és súlyértékek meghatározása – saját szerkesztés

2. lépés: 1-től 4-ig terjedő skálán az egyes kritériumértékek értékelése

- 1= Gyenge teljesítmény
- 2 = Közepes teljesítmény
- 3 = Jó teljesítmény
- 4 = Legjobb teljesítmény

A 7. táblázat az egyes kritériumok pontozását mutatja az egyes kobotokra. Az 1-4 közötti értékek megadására két módszer van. Az első, hogy bizonyos intervallumokat határozzunk meg, hogy az adott intervallumba eső érték alapján hány pontot kap az adott alternatíva, a másik megoldás, pedig az, hogy egymáshoz viszonyítjuk őket, ahol a célfüggvényhez legközelebb álló kapja a legnagyobb pontot, a második legjobb alternatíva a második legmagasabb pontot és így tovább. Ebben a megoldásban a második módszert követjük.

		Universal Robots UR5e		KUKA LBR IIWA 7		Techman Robot TM5-900		ABB GoFa CBR 15000	
#	Kritérium	Érték	Pont	Érték	Pont	Érték	Pont	Érték	Pont
1	Ár	28,750 €	3	62,500€	1	27,000 €	4	31,500€	2
2	Max. teherbírás	5 kg	3	7 kg	4	4 kg	2	5 kg	3
3	Vezérelt tengelyek száma	6	3	7	4	6	3	6	3
4	Max. kinyúlás	850 mm	2	800 mm	1	900 mm	3	950 mm	4
5	Pozíció ismétlés	0.1 mm - 0.03 mm	2	+/- 0.1 mm	4	+/- 0.05 mm	3	+/-0.05 mm	3
6	Súly	20.6 Kg	4	23 Kg	2	22.6 Kg	3	27 Kg	1
7	Lábméret	149 mm	3	136 mm	4	152 mm	2	165 mm	1
8	Biztonság	IP54	4	IP54	4	IP54	4	IP54	4
9	Mozgási sebesség	1000 mm/s	1	1500 mm/s	3	1400 mm/s	2	2200 mm/s	4

7. táblázat: Alternatívák pontjainak meghatározása – saját szerkesztés

3. lépés: Etalon meghatározása

Egy elméleti legjobb megoldás (etalon) pontértékeinek a megadása a kritériumokhoz. Mivel legjobb megoldás, ezért mindenhol a legmagasabb értéket fogja kapni az etalon, vagyis esetünkben a 4-et.

Egy elméleti tökéletes alternatívát azért szükséges létrehozni, hogy a meglévő valós alternatíváinkat ehhez az etalonhoz tudjuk viszonyítani, hogy mekkora teljesítményre képesek. A gyakorlati alternatívák elméletileg soha nem érhetik el a meghatározott etalon teljesítményét, maximum megközelíthetik azt. A mi rendszerünkben az 1-4 közötti pontozást alkalmazzuk, de ez lehetne 0-4 vagy eltérő pontrendszer is.

#	Kritérium	Etalon pontértéke
1	Kritérium	4
2	Ár	4

3	Max. teherbírás	4
4	Vezérelt tengelyek száma	4
5	Max. kinyúlás	4
6	Pozíció ismétlés	4
7	Súly	4
8	Lábméret	4
9	Biztonság	4
10	Mozgási sebesség	4

8. táblázat: Etalon pontértékének meghatározása– saját szerkesztés

4. lépés: Technikai értékek meghatározása

A technikai érték meghatározása úgy történik, hogy a 7. és 8. táblázatban meghatározott pontértékeket tömbökként kell kezelni, majd ezeket a tömböket a szorzatösszeg függvény segítségével összegezni kell. Az egyik tömb mindig az adott alternatíva pontértékei, a másik pedig mindig a W_i súlykritériumok tömbje.

- Etalon technikai értéke: 4
- Universal Robots UR5e technikai értéke: 2,47
- KUKA LBR IIWA 7 technikai értéke: 2,6
- Techman Robot TM5-900 technikai értéke: 2,93
- ABB GoFa CBR 15000 technikai értéke: 3,02

5. lépés: Alternatívák összehasonlítása az etalon

- Universal robot pontértéke az etalonhoz viszonyítva:

$$\frac{2,47}{4} = 0,6175 \quad (8)$$

- Kuka LBR pontértéke az etalonhoz viszonyítva:

$$\frac{2,6}{4} = 0,65 \quad (9)$$

- Techman robot pontértéke az etalonhoz viszonyítva:

$$\frac{2,93}{4} = 0,7325 \quad (10)$$

- ABB GoFa pontértéke az etalonhoz viszonyítva:

$$\frac{3,02}{4} = 0,755 \quad (11)$$

6. lépés: Eredmények értékelése

Az értékelés a következőképpen történik:

- 0,5-nél kisebb pontérték: elfogadhatatlan
- 0,5 és 0,6 közötti pontérték: megfelelő
- 0,6 és 0,8 közötti pontérték: jó
- 0,8 feletti pontérték: kiváló.

#	Alternatíva	Teljesítmény	Értékelés
1	Universal Robots	61,75%	Megfelelő
2	Kuka LBR IIWA 7	65%	Jó
3	Techman Robots	73,25%	Jó
4	ABB GoFa	75,5%	Jó

9. táblázat: Etalon pontértékének meghatározása– saját szerkesztés

A 9. táblázatban található az eredmények összefoglalása. Eszerint a kiválasztott négy alternatíva közül a legjobb eredményt az ABB GOFa kobotja érte el, a második a Techman, harmadik a Kuka és negyedik helyen az Universal található.

3. Összefoglalás

A tanulmány során az Analytical Hierarchy Process (AHP) és a Kesselring módszer segítségével elvégeztük négy darab előre meghatározott kobot összehasonlítását a technikai paraméterek figyelembe vételével. A négy alternatívát kilenc kritérium mentén vetettük egybe. Először az AHP módszer segítségével meghatároztuk a kilenc darab kritérium egymáshoz viszonyított fontosságát, majd az ebből kapott fontossági súlykritériumot vittük tovább az elemzés során. Ezután a Kesselring módszerrel a megfelelő pontértékeket és technikai értékeket meghatároztuk. Ezen értékek felhasználásával sikerült megállapítani az alternatíváink teljesítményét a fontossági súlyértékkel korrigált kritériumokhoz képest. Az eredmények szerint a felsorolt négy alternatíva közül az ABB GoFa kobotja végzett az első helyen, így azt mondhatjuk, hogy a legfontosabb technikai paraméterek szempontjából ez a legjobb választás.

Hivatkozások

- [1] El Zaatari, S. - Marei, M. - Li, W. - Usman, Z. (2019) 'Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview', *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 116, pp. 162–180, doi: 10.1016/j.robot.2019.03.003.

- [2] Bicchi, A. - Peshkin M. A. - Colgate J. E. (2008) 'Safety for Physical Human–Robot Interaction', *Springer Handbook of Robotics*, pp. 1335–1348, doi: 10.1007/978-3-540-30301-5_58.
- [3] Kolbeinsson, A. – Lagerstedt E., Lindblom J. (2019) 'Foundation for a classification of collaboration levels for human-robot cooperation in manufacturing', *Production & Manufacturing Research*, vol. 7, no. 1, pp. 448–471, doi: 10.1080/21693277.2019.1645628.
- [4] Weiss, A. - Wortmeier, A. K. - Kubicek B. (2021) 'Cobots in Industry 4.0: A Roadmap for Future Practice Studies on Human–Robot Collaboration,' *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, vol. 51, no. 4, pp. 335–345, doi: 10.1109/thms.2021.3092684.
- [5] Sherwani, F. - Asad, M. M. - Ibrahim, B. (2020) 'Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0)', *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*, Karachi, Pakistan, pp. 1–5., doi: 10.1109/ICETST49965.2020.9080724.
- [6] Ostergaard, E. H. (2017) 'The role of cobots in Industry 4.0', Universal Robots
- [7] Nasanjargal, E. – Kocsi, B. – Máté, D. (2022) ' A Risk-Based Analysis Approach to Sustainable Construction by Environmental Impacts' *Energies*, 15, 6736. , doi: 10.3390/en15186736
- [8] Saaty, T. L. (1980), *The analytic hierarchy process*. Maidenhead: McGraw-Hill (in English).
- [9] Dong, Q. - Saaty, T.L. (2014) 'An analytic hierarchy process model of group consensus' *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 362–374, doi: 10.1007/s11518-014-5247-8
- [10] Rapcsák T. (2007) 'Többszemponú döntési problémák', Budapesti Corvinus Egyetem, p. 111.
- [11] Harrington, J. E. (2009), 'Games, strategies and decision making', Worth Publishing. ISBN 9781429239967
- [12] Adams, J. - Juleff, L. (2003) 'Managerial economics for decision making', Palgrave. ISBN 9780333961117
- [13] INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS (2022): "World Robotics Industrial Robots 2022," report.
- [14] Universal Robots, Universal Robot UR5e, Forrás: <https://www.universal-robots.com/hu/e-series/> (letöltve: 2022.10.13.)
- [15] KUKA Robots, KUKA LBR IIWA 7, Forrás: <https://robots.ieee.org/robots/lbriiwa/> (letöltve: 2022.10.13)
- [16] ABB GoFa, ABB GoFa CRB 15000, Forrás: <https://qviro.com/product/abb/gofa-crb-15000> (letöltve: 2022. 10. 13.)
- [17] Techman Robot, Techman Robot TM5-900 <https://wiredworkers.io/nl/product/tm5-900/> (letöltve: 2022.10.13.)