https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.9

ELEKTROMOS OFF-ROAD KISJÁRMŰ TERVEZÉSI TAPASZTALATAI

DESIGN EXPERIENCES OF ELECTRIC OFF-ROAD SMALL SCALE-VEHICLE

Fekécs Bálint[*], *Marai Ádám*[*], *Nyirő Ákos*[**], *Dr. Háry András*[***]

ABSTRACT

The spread of electric vehicles can be observed not only in the field of road vehicles, but also in the area of off-road vehicles. The aim of the project presented in this paper was to create a small-scale prototype of an off-road carrier vehicle platform. The entire development process was carried out using the tools of systematic product design. The aim of the paper is to summarize the experiences gained during this development and to draw conclusions about the design methodology for further research.

1. BEVEZETÉS

A terméktervezés módszeressége jelentős fejlődésen ment keresztül az elmúlt évtizedekben. Napjainkra nemcsak a tervezés módszertani háttere és szélekörű eszköztára érhető el, de a tervezést és a tervezési folyamatot hatékonyan támogató eszközök, szoftverek, menedzsment technikák is rendelkezésre állnak.

A jelent projekt tárgya több szempontból is speciális. Az off-road, azaz nem közúton használatos mobil eszközök fejlesztési eljárásai az autóipar igen kiforrott követelményeire és folyamataira csak részben tudnak támaszkodni. Ez amiatt is így van, mivel nem iparág-specifikus megoldásokról van szó, ezért a módszertant tekintve az általános tervezési metodológiákhoz közelebb állnak ezek a termékek. Másik oldalról, mivel mozgó eszközökről, és ebben az értelemben mégiscsak "járművekről" van szó, magukon hordozzák a jármű termék fejlesztésének minden sajátosságát – a komplexitást, a több részrendszerre épülő architektúrát, a hagyományos jármű egységek tervezési szempontjait.

Ez adja a jelen cikk mögött levő projekt, illetve a kapcsolódó kutatások specifikumát, amely indokolja, hogy az off-road mobil platformok tervezési módszertanával külön érdemes foglalkozni. A cikkben bemutatásra kerülő módszertan egy hosszabb távú fejlesztési program egy eleme, a cél itt egy olyan gyakorlatias, ugyanakkor számos tanulságot hordozó fejlesztési folyamat bemutatása, amelyre a későbbiekben is lehet építeni.

Az off-road mobil platformok (kapcsolódva az autonomous mobile platform elnevezésű területhez) témaköre egy igen intenzíven fejlődő szegmens. Piacuk dinamikusan fejlődik, amelyet a legtöbb területen növekvő automatizálási igény és a munkaerőhiány egyaránt ösztönöz. A moduláris, többféle feladatra konfigurálható platformok versenyelőnyt jelenthetnek, mivel csökkenthetik a fejlesztési és üzemeltetési költségeket.

Bár a hétköznapi közlekedésben ritkán találkozunk velük, az off-road mobil platformok fontos szerepet töltenek be számos ágazatban. Sok olyan terület van, ahol az épített útfelület hiányzik vagy nehezen járható, mégis szükség van szállításra és munkavégzésre. Ilyen a modern mezőgazdaság, a bányászat, az építőipar, a katasztrófavédelem, az űrkutatás, vagy a honvédelem, ahol a gumikerekes platformok nehezen végezhető, veszélyes vagy monoton feladatokat veszik át. Fejlesztésüket ma két fő irány határozza meg: a hatékony elektromos hajtásláncok alkalmazása, valamint az önvezető, autonóm vezérlések beépítése.

2. AZ OFF-ROAD MOBIL PLATFORMOK SZEREPE

Az off-road platform járművek esetében terepen a legnagyobb kihívást a talaj deformálódása és a nedvességtartalomtól függő, változó viselkedése jelenti. Ezt a fizikai és dinamikai kapcsolatot a terramechanika szakterülete vizsgálja, amelynek alapjait Bekker és Wong [3] [4] [5] [6] fektették le, különválasztva a munkagépekkel foglalkozó terepformáló és a járművek mozgékonyságát leíró terepi jármű mechanikát. Tömör talajon a kerék terheléséből adódó függőleges feszültségeloszlás a Boussinesq-összefüggéssel írható le, a gumiabroncs nem pontszerűen, hanem egy véges felfekvő felületen adja át a terhelést. Söhne [7] kimutatta, hogy nedvesebb talajon a feszültségek egyre inkább a kerék alatti középpont felé koncentrálódnak. Száraz, kemény földön a kerék alig süllyed be és kis felületen érintkezik a talajjal, míg nedves, laza terepen mélyebb nyomot hagy, de a felfekvő felülete is több mint duplájára nőhet. Ezért homokos talajon a megfelelő gumimintázat, sziklás terepen pedig az alacsonyabb guminyomás segíti a tapadást. A sikeres haladás végül azon múlik, hogy a kerék vonóereje – amelyet a talaj kohéziója és belső súrlódása korlátoz – le tudja-e küzdeni a talaj

* *mérnök gyakornok, Széchenyi István Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.*
** *mérnök gyakornok, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.*
*** *vezérigazgató, ZalaZONE Ipari Park Zrt.*

összenyomódásából fakadó gördülési ellenállást, az akadály- és a lejtőellenállást [8].

A kerék és a talaj közötti összetett kölcsönhatást a gyakorlatban három fő módon vizsgálhatjuk: elméleti számításokkal, laboratóriumi talajvályús kísérletekkel és valós terepi tesztekkel. Maguk az elméleti modellek is három csoportra oszthatók: (1) az empirikus módszerek kúpos penetrométeres méréseken alapulnak, és gyors becslést adnak az átjárhatóságra; (2) a fél-empirikus módszerek Bekker elméletét és a Bevameter mérőeszközzel felvett görbéket ötvözik, így kiválóak a futómű gyors optimalizálására; míg (3) a numerikus módszerek – a talajt folytonos közegként kezelő végeselem-módszer, a szemcséket szimuláló diszkrét elemes módszer és a hibrid módszer adják a legpontosabb képet a talajdeformáció, illetve jármű viszonyáról. Wong rendszeranalízise szerint a terep adottságai és a küldetési célok közvetlenül meghatározzák a jármű öt fő alrendszerének tervezését és az autonóm algoritmusokat [5] [9] [10].

A jelen cikkben bemutatott projekt pontosan ebbe a Wong-féle rendszeranalízisbe illeszkedik. Mivel a referenciaként vizsgált ipari platformok rendkívül drágák, a cél volt egy univerzális, többféle további fejlesztési irányt is lehetővé tevő, kisméretű prototípus jármű fejlesztése, elektromos gumikerekes tesztplatform kivitelben.

A fejlesztés előzménye egy „deszkamodellnek” tekinthető miniatűr eszköz volt, a jelen fejlesztési szakasz már funkcionálisan közel teljeskörű, méreteiben csökkentett, ugyanakkor fejlesztési módszertanában kiforrott. A jármű aktuális kivitele teleoperációs módon irányítható, jelenleg azonban már folyik a magasabb szinten automatizált megoldás kialakítása, haladva az önvezető jármű platform irányába.

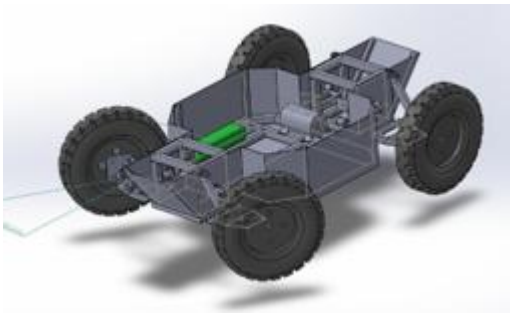


1. ábra A kifejlesztett prototípus jármű

A felhasználói igényeket szisztematikus módszertannal fordítottuk le műszaki paraméterekre, a megépített prototípust pedig valós terepi tesztekkel validáltuk. Ahhoz azonban, hogy a jármű a terepen fellépő ellenállásokat leküzdje, a motor által kifejtett erőt célszerűen kell eljuttatni a kerekekhez. Ezt biztosítja a jármű hajtásláncának kialakítása, amely az erőforrástól, a főhajtóművön és a féltengelyeken keresztül viszi át a hajtást a gumikerekekre.

3. AZ ALKALMAZOTT TERVEZÉSI MÓDSZERTAN

Egy jármű fejlesztése komplex mérnöki kihívás, amely a gépészeti struktúrák és az elektromos hajtáslánc szoros integrációját követeli meg. A projekt során egy szisztematikus, egymásra épülő lépésekből álló módszertant alkalmaztunk. Az első lépés a piaci igényekből kiindulva, a fejlesztési követelmények és az elvárások rögzítése volt, amely minden projekt kezdetekor kiemelt fontosságú. Ezt követte a szakirodalmi kutatás a releváns műszaki megoldások és technológiák feltérképezésére. Ezekre az alapokra támaszkodva végeztük el a jármű átfogó rendszertervezését, melyben elemeztük, hogy a járműnek milyen fő alegységei kell, hogy legyenek és azok milyen kapcsolatban vannak egymással. Ilyen alegységek a váz-platform, hajtáslánc, automatizált funkciók, szenzorok és vezérlőrendszerek. Következő lépés volt a termék koncepció kidolgozása CAD-es 3D modellezési fázisban.



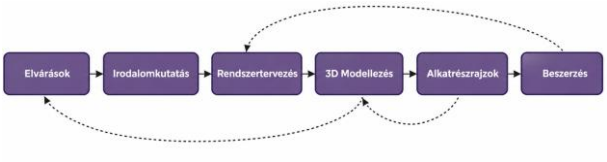
2. ábra 3D Modell

A folyamatot a gyártáshoz és összeállításhoz szükséges alkatrészrajzok elkészítése, valamint a meghatározott alkatrészek beszerzése zárta le. A tervezés lépéseit a 3. ábra foglalja össze.

A módszeres tervezés alapgondolata, hogy a véletlenszerű, „próbálkozásos ötletelést” egy logikusan felépített mérnöki folyamat váltsa fel. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a teljes járművet érintő „nagy feladatot” jól átlátható, kisebb mérnöki részproblémákra bontjuk. Ezzel a módszerrel a konkrét elvárásokból, mint például a megcélzott hatótáv vagy a terhelhetőség, lépésről lépésre jutunk el a konkrét, gyártható alkatrészekig. [1] [2]

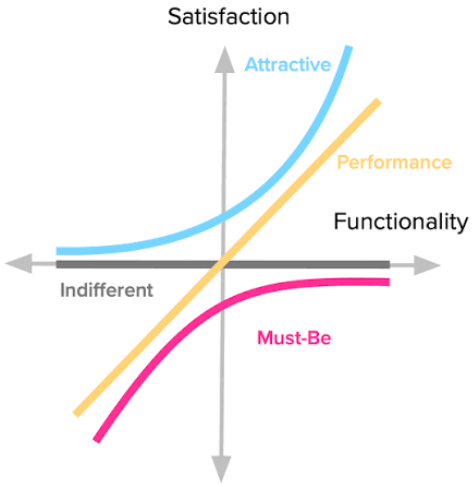
A módszeres tervezési megközelítés egyik fő gyakorlati haszna, hogy a tervezési folyamat közben hozott döntések később is visszakövethetőek maradnak. Emellett az elkerülhetetlen módosításokat és visszacsatolásokat még a tervezőasztalon vagy a CAD szoftverben el lehet végezni. Így a hibák jó része nem a

fizikai építés és az alkatrészbeszerzés során derül ki, amivel rengeteg időt és felesleges költséget meg lehet takarítani.



3. ábra A tervezési folyamat

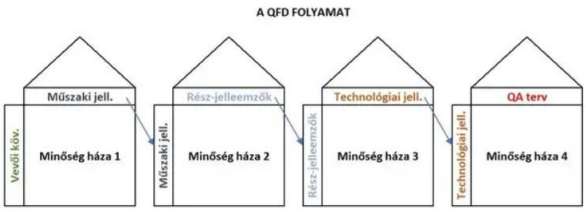
A módszeres tervezés kezdeti fázisában, az elvárások kategorizálásához és lebontásához számos módszer elérhető. Ezek közül az egyik legismertebb a *Kano-modell*, amely a termékfejlesztést segíti a vevői igények priorizálásával, amely félreértéseken alapuló későbbi erőfeszítéseket, időt és pénzt takaríthat meg. A modell a vevői elvárásokat öt kategóriába sorolja: az elengedhetetlen alapkövetelmények, a versenyalapot jelentő teljesítményelvárások, a semleges közömbös és az egyénfüggő zavaró tényezők, valamint a váratlan örömet okozó, innovatív vonzó tulajdonságok. Gyakorlati haszna, hogy segítségével a tervezés során a leginkább megtérülő, legnagyobb vevői elégedettséget hozó funkciókra lehet fókuszálni. [13]



4. ábra Kano modell

A jelen projekt során a Kano modell alkalmazása úgy történt, hogy összegyűjtésre került 50 darab termék tulajdonság, majd megtörtént ezeket besorolása a fent említett öt kategóriába. Ennek eredményeként egyértelművé vált, hogy melyek azok a tényezők, amelyek kiemelkedően fontosak a végső kimenet szempontjából. és melyek a kevésbé lényegesek.

A *QFD* (Quality Function Deployment, azaz minőségi funkció lebontás) egy olyan tervezési módszertan, amely a vevői igényeket, a tervezési célokat és a gyártási sajátosságokat köti össze, így a termékfejlesztés fókuszában végig a fogyasztó elvárásai maradnak. A modell a fejlesztési folyamatot egy négy szintből álló ún. „Minőség házán" keresztül vezeti le. A vevői igényeket először konkrét műszaki paraméterekre, majd azokat a termék egységekre/alkatrészekre, aztán gyártási folyamatokra, végül pedig minőségellenőrzési lépésekre fordítja le. Gyakorlati alkalmazása különösen hasznos, ha hiányzik a dokumentált követelményrendszer, mivel egységes, átfogó keretet és irányt ad a fejlesztők számára. [14]



5. ábra QFD modell

A projekt megvalósítása során a a QFD módszertan segítségével fordítottuk le a vevői elvárásokat – mint például az elakadásmentes, stabil és hosszú üzemidejű működés – konkrét mérnöki paraméterekké. Ezen igények alapján határoztuk meg a jármű legfontosabb műszaki jellemzőit.

Az off-road jármű tervezési alternatíváit egy átfogó rendszertervben foglaltuk össze. [15] A termék így előálló *rendszertérképe* strukturáltan mutatja be a jármű lehetséges alkalmazási területeit (mezőgazdasági, ipari stb.), a fizikai méretkategóriákat és a megcélzott terepviszonyokat. Számba veszi például az alváz anyaghasználatát és a platform kialakítását, a futómű szerkezetét, vagy a mobilitást biztosító kerék kialakítási opciókat. A hajtáslánc ágon feltérképezi a két- vagy négykerék-meghajtás erőátviteli módjait, a kefe nélküli és szénkefés villanymotorokat, továbbá a kanyarodást biztosító kormányű-kialakításokat. Az elektronikai alrendszerben pedig részletezi az autonóm és távirányítású vezérléshez választható mikrovezérlőket, a por- és vízállósági (IP) elvárásokat, a lehetséges akkumulátortípusokat, valamint az építéshez szükséges kiegészítő szerelési anyagokat.

A módszeres tervezés egyik legnagyobb gyakorlati kihívása az *elméleti követelmények és a valós gyártási, illetve beszerzési lehetőségek* (BOM – Bill of Material lista) összehangolása. Bár a 3D modellezés sokat segít az alrendszerek elrendezésében, a mechanika, a hajtás és az elektronika fizikai integrálása szinte mindig elkerülhetetlen kompromisszumokat követel. Az egyes elvárt termékjellemzők közötti ellentmondásokat a követelményjegyzéknél lehet ugyan elemezni, és törekedni ezek elkerülésére, de a gyárthatósági, beszerezhetőségi szempontok a későbbi fázisokban is szükségessé teszik a visszatérést akár egy-egy kitűzött termékjellemző újragondolásához. A megvalósítás során válik tehát egyértelművé, hogy az elméleti koncepcióból csak folyamatos iterációkkal és gyakorlati kompromisszumokkal építhető egy sok követelménynek egyszerre megfelelő jármű megoldás. Kevés szó esik a gazdasági kérdésekről, ez külön kutatás tárgya lehet, de ki kell emelni a költséghatékonyság szempontjait is, erre minden egyes tervezési lépésnél figyelemmel kell lenni.

4. A LÉTREHOZOTT TERMÉK

A jármű funkcionális céljaként egy mezőgazdaságban használt szabványos göngyöleg szállítási képessége került kitűzésre, akár sáros, meredek terepen is, ezáltal hasznos szerepet vállalva különböző feladatok elvégzésében, például ültetvények környezetében.



6. ábra A jármű burkolat nélkül

A jármű hordozó alapjaként egy egyedi kialakítású váz szolgál, amely pontos tervezés után, zártszelvényből került legyártásra. A szabványos anyagnak köszönhetően, a jól modellezhető szerkezeti tulajdonságok mellett, könnyedén lehetett rajta utólagosan is módosítani, ha azt egy-egy későbbi iterációs változtatás megkívánta. A problémamentes futáshoz 4 darab, a méret követelményekbe illeszkedő, piacon kapható kereket kapott, amelyek egyszerre biztosítják a megfelelő tapadást és hasmagasságot.

A hajtásról egy 1800 W-os elektromotor gondoskodik, amely láncos átvitelen keresztül forgatja meg mindkét tengelyt; a jobb menettulajdonságok érdekében ezekre egy-egy differenciálmű is került. A lánc feszessége, illetve a nyomatékleadás folyamatossága érdekében 4 láncfeszítő került elhelyezésre. Ezeken saját készítésű műanyag görgők kaptak helyet.

A féket és a kormányzást is egy-egy szervomotor kezeli; a féket 20 kg/cm-es, míg kormányzást 60 kg/cm-es tolóerővel. A fék funkciót egy szokványos, tárcsás fék látja el, amely az első tengelyen kapott helyet.

Energiaforrásként két akkumulátor került elhelyezésre: egy 48V 21Ah-es lítium-ion amely az elektromotort és a vezérlőket, és egy kisebb 12V 9Ah-es zselés kivitelű pedig a fék-és kormányszervót látja el energiával.

Az irányításért egy multifunkciós, elsősorban modellautókhoz fejlesztett kézi adóegység felel, amelynek jelét egy Arduino mikrovezérlő értelmezi és továbbítja, ezáltal vezérelve a jármű mozgását. A szervomotorok egyes paramétereit az erre a célra készült programon keresztül lehet beállítani.

Az elektronikai alkatrészek megóvása, illetve az esztétikusabb megjelenés érdekében a szerkezet rendelkezik egy fémlemezből kialakított burkolattal.

Tömeg	70 kg
Teherbírás	20 kg
Zajszint	80 dB
Hatótáv	10 km
Sebesség	4 m/s
Teljesítmény	5 kW
Energia fogyasztás	3 kWh
Vezérlési távolság	300 m
Töltési idő	1 h
Oldalirányú borulási szög	45°
Kanyarodási ív rádiusza	3 m
Hajlítási merevség	5 mm
Rugóállandó	2000 N/m

7. ábra Jármű műszaki paraméterek

5. TESZTELÉSI ÉS VALIDÁCIÓS TAPASZTALATOK

A kifejlesztett jármű megalkotása csak a folyamat egyik mérföldköve, hiszen a prototípus terveknek megfelelő megépítése önmagában nem bizonyítja, hogy a jármű megfelelően működik, így annak tesztelése legalább olyan fontos része a terméktervezési folyamatnak. A konstrukció működőképességének és a meghatározott műszaki követelményeknek való megfelelőségének igazolásához *átfogó tesztelési és validációs folyamat* szükséges. A járműipari standardokra épített módszeres tesztelési program segített feltárni a prototípus hibáit, problémáit, így fókuszálva tudtuk a kritikus irányokba fejleszteni a járművet. [11] [121]

A termék végső validációja során a tesztelési módszernek objektív, dokumentálható, illetve megismételhető eredményeket kell produkálnia. A méréseket egy *tesztmátrixra* építettük fel, amely tartalmazta a Kano modell alkalmazásával kijelölt, és a QFD-vel lebontott fő paraméterek elvárt célértékeit. Ezek alapján lehet kategorizálni a validáció eredményeit megfelelő, nem megfelelő vagy részben megfelelő osztályokba. A validációs méréseket két fő csoportra bontottuk: típusminősítések, itt elsősorban a jármű meghatározott műszaki tulajdonságainak és követelményeinek teljesülését vizsgáltuk, illetve működés közben mért mérések, ahol a cél a jármű tényleges üzemeltetési körülmények közötti viselkedésének megfigyelése volt. A jármű tesztelése nem csak egy egyszeri esemény, hanem a további fejlesztést is támogató visszacsatolási folyamat.



9. ábra A tesztelés és validáció folyamata

A tesztelés során a vizsgálandó paraméterek a tervezési folyamat legelején meghatározott követelményjegyzéket veszik alapul. Minden egyes tesztnél mérlegelendő az ismétlési szám, tekintettel arra, hogy ezen fázisban még csak funkcionális próbáról, nem megbízhatósági tesztről van szó.

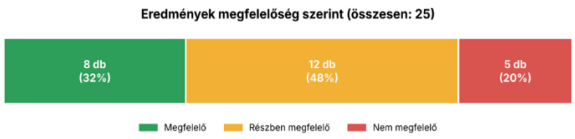
Vizsgált terület	Vizsgálatok
Automatizált funkciók	pl.: Kamerás rendszer, Állapot visszajelzők…
Platformtervezés	pl.: Vázszerkezet merevsége, Terhelhetőség…
Rendszertervezés	pl.: Üzemi terepszög, Hatótáv, Zajszint…
Hajtásrendszer	pl.: Sebesség, Teljesítmény, Energiafogyasztás…
Szenzor- és vezérlőrendszer	pl.: Vezérlési távolság, Forráskód…

10. ábra A tesztelés során vizsgált paramétercsoportok



11. ábra Jármű tesztelés közben

Egy mérési eredményt megfelelőnek kategorizáltunk, amennyiben meghaladta a kitűzött célt; részben megfelelőnek, ha a minimum és a maximum célérték közé esett. Nem megfelelő kategóriába azok a mérések kerültek, amelyek nem érték el az előre meghatározott minimum értéket. Az eredményekből leszűrhető, hogy a fejlesztés alapvetően teljesíti a paramétereket, néhány esetben túlszárnyalja az elvárásokat, ugyanakkor egyes paramétereknél alulmaradt a kitűzött érték tekintetében.



12. ábra A tesztek eredményei

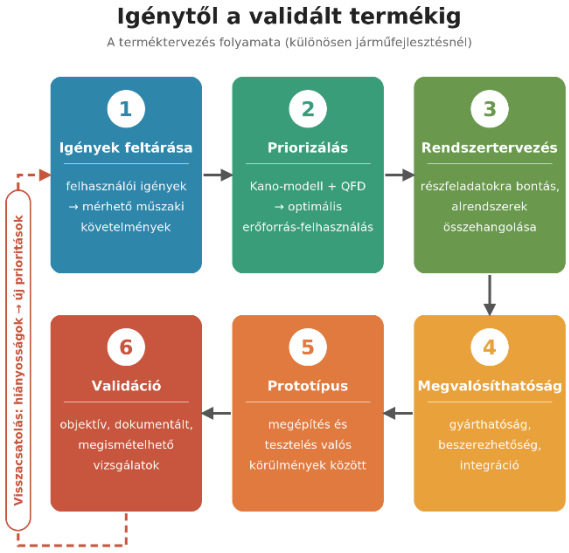
A mérések fontos tapasztalata, hogy a sikertelen vagy csupán részben sikeres vizsgálatok is rendkívül értékesek lehetnek. Ezek a hibák a fejlesztők elé helyezik a konstrukció gyengeségeit vagy akár a jármű prototípusának hiányzó funkcióit. Mindezek alapján az egyik legfontosabb tanulság, hogy bár a sikeres vizsgálati eredmények elengedhetetlenek, a fejlesztés szempontjából a sikertelen és részben sikeres vizsgálatok különösen értékes információkat szolgáltatnak, hiszen ezek világítanak rá a konstrukció hiányosságaira és a további fejlesztési lehetőségekre.

6. ÖSSZEFOGLALÓ, MÓDSZERTANI KÖVETKEZTETÉSEK

A projekt eredményeként a következő tanulságokat szűrhetjük le:

1. A hatékony terméktervezés alapja a felhasználói igények szisztematikus feltárása és konkrét, mérhető műszaki követelményekké alakítása.
2. A Kano-modell és a QFD módszertan alkalmazása segíti a követelmények priorizálását, valamint a fejlesztési erőforrások optimális felhasználását.
3. A rendszeralapú tervezés és a részfeladatokra bontás átláthatóbbá teszi a komplex mérnöki problémákat, és biztosítja az egyes alrendszerek összehangolását, ez járműfejlesztésnél különösen fontos.
4. A tervezési döntések során figyelembe kell venni a gyárthatóságot, az alkatrészek beszerezhetőségét és a különböző műszaki rendszerek integrációját.
5. A prototípus megépítése és valós körülmények közötti tesztelése elengedhetetlen a tervezési követelmények teljesülésének igazolásához.
6. Az objektív, dokumentálható és megismételhető validációs vizsgálatok lehetővé teszik a konstrukció hiányosságainak feltárását és a fejlesztési prioritások meghatározását.

A projekt végkonklúziója, hogy a terméktervezés iteratív folyamat, amelyben az egymás utáni fázisok visszacsatolásai, a termék részrendszerek közötti feladatok összehangolása, továbbá a teszteredményekre épülő visszacsatolás biztosítja a megbízható, felhasználói igényeknek megfelelő végtermék kialakítását.



13. ábra Általánosított tervezési séma

A kapcsolódó kutatások további lehetőségei:

- A tervezési módszertan továbbfejlesztése, a feltárt tanulságok alapján (az iterációs intenzitás erősítése, visszacsatolások rendszere).
- A jármű méretének növelése, valós felhasználási környezetbe való illesztése.
- Az automatizáltsági szint emelése, egyes autonóm funkciók beépítése.

7. SUMMARY, CONCLUSIONS ON DESIGN METHODOLOGY

As a result of the project, the following conclusions can be drawn:

1. The basis of effective product design is the systematic exploration of user needs and their translation into specific, measurable technical requirements.
2. The application of the Kano model and the QFD methodology helps to prioritize requirements and optimize the use of development resources.
3. System-based design and the division into sub-tasks make complex engineering problems more transparent and ensure the coordination of the individual subsystems, which is especially important in vehicle development.
4. Design decisions must take into account manufacturability, the availability of components and the integration of different technical systems.
5. Building a prototype and testing it in real-world conditions is essential to verify that the design requirements are met.
6. Objective, documentable and repeatable validation tests make it possible to identify the deficiencies of the design and to determine further development priorities.

The final conclusion of the project is that product design is an iterative process, in which the feedback of successive phases, the coordination of tasks between product subsystems, and feedback based on test results ensure the development of a reliable final product that meets user needs.

Further opportunities of the related research:

- Further development of the design methodology based on the lessons learned (strengthening iteration intensity, system of feedbacks).
- Increasing the size of the vehicle and fitting it into the real environment of use.
- Increasing the level of automation, incorporating certain autonomous functions.

8. IRODALOM

[1] Hansen, F. (n.d.). A módszeres géptervezés (L. Lehoczky, Ford.). ODR Portál. https://odrportal.hu/web/guest/record/-/record/MOKKAS0000497186

[2] Huba, A., Aradi, P., Czmerk, A., Lakatos, B., Chován, T., & Varga, T. (n.d.). Mechatronikai berendezések tervezése. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. https://mogi.bme.hu/TAMOP/mechatronikai_berendezesek_tervezese/ch19.html

[3] Bekker, M. G. (1956). Theory of land locomotion: The mechanics of vehicle mobility. University of Michigan Press.

[4] Bekker, M. G. (1969). Introduction to terrain-vehicle systems. University of Michigan Press.

[5] Wong, J. Y. (2010). Terramechanics and off-road vehicle engineering: Terrain behaviour, off-road vehicle performance and design (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

[6] Wong, J. Y. (2022). Theory of ground vehicles (5th ed.). Wiley.

[7] Söhne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural Engineering, 39, 276–281.

[8] Taheri, S., et al. (2015). A technical survey on terramechanics models for tire–terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles. Journal of Terramechanics, 57, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.08.003

[9] He, R., et al. (2019). Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications. Journal of Terramechanics, 81, 3–22.

[10] Yu, S., et al. (2025). A real-time terrain-adaptive local trajectory planner. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 26(3), 3324–3340.

[11] Wiecher, C., Mandel, M., Günther, J., Fischbach, J., Greenyer, M., Greinert, C., Wolff, R., Dumitrescu, D., Mendez, D., & Albers, A. (n.d.). Model-based analysis and specification of functional requirements and tests for complex automotive systems. https://doi.org/10.1002/sys.21748

[12] Jacoff, A. S., Huang, H.-M., Messina, E. R., Virts, A. M., & Downs, A. J. (n.d.). Comprehensive standard test suites for the performance evaluation of mobile robots. National Institute of Standards and Technology. https://www.nist.gov/publications/comprehensive-standard-test-suites-performance-evaluation-mobile-robots

[13] Kenesei, Z. (2017). Az elégedettség mérése a Kano-modell kétpólusú elvének alkalmazásával. Statisztikai Szemle. https://doi.org/10.20311/stat2017.01.hu0029

[14] Fodor, T. (n.d.). Mi a QFD és mire, mikor és hogyan alkalmazható? https://www.tfodor.hu/blog/?mi-a-qfd-es-mikor,-mire-es-hogyan-alkalmazhato

[15] Termék specifikációk ábrája (ZalaZONE belső dokumentum)