

A mesterséges intelligencia alkalmazásai a hibamód- és hatáselemzésben

Artificial Intelligence Applications in Failure Mode and Effects Analysis

KERNÁCS Martin¹, Dr. HORNYÁK Olivér²

¹ Miskolci Egyetem Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Miskolc, Egyetem út 1, 3515,
<https://geik.uni-miskolc.hu/hatvany>, martin.kernacs@gmail.com

² Miskolci Egyetem Informatikai Intézet, Miskolc, Egyetem út 1, 3515,
<https://infi.iit.uni-miskolc.hu>, oliver.hornyak@uni-miskolc.hu

Abstract

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is a widely used methodology for identifying potential failure modes and assessing their associated risks in industrial systems. However, conventional FMEA relies heavily on expert knowledge, making the process time-consuming and potentially subjective, particularly in complex industrial environments with large volumes of technical and maintenance data. Recent advances in artificial intelligence (AI) and large language models (LLMs) offer new opportunities to support and partially automate FMEA activities.

Keywords: Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Large Language Models (LLMs), Artificial Intelligence (AI), industrial application

Kivonat

A hibamód- és hatáselemzés (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) széles körben alkalmazott módszertan az ipari rendszerek lehetséges hibamódjainak azonosítására és az azokhoz kapcsolódó kockázatok értékelésére. A hagyományos FMEA jelentős mértékben támaszkodik a szakértői tudásra, ezért alkalmazása összetett ipari környezetben, nagy mennyiségű műszaki és karbantartási adat esetén időigényes és bizonyos mértékig szubjektív lehet. A mesterséges intelligencia (MI), különösen a nagy nyelvi modellek (Large Language Models, LLM-ek) fejlődése új lehetőségeket kínál az FMEA egyes feladatainak támogatására és részleges automatizálására.

Kulcsszavak: Hibamód- és hatáselemzés (FMEA), Nagy nyelvi modellek (LLM), Mesterséges intelligencia (MI), ipari alkalmazás

1. BEVEZETÉS

A Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) [1], magyarul hibamód- és hatáselemzés, az ipari rendszerek megbízhatóságának, biztonságának és üzembiztonságának növelésére széles körben alkalmazott kockázatelemzési módszertan. Az FMEA alapvető célja a rendszerben, berendezésben vagy folyamatban potenciálisan előforduló hibamódok szisztematikus azonosítása, azok lehetséges okainak és következményeinek feltárása, valamint a kapcsolódó kockázatok értékelése. A módszertan lehetővé teszi, hogy a potenciális meghibásodásokat azok bekövetkezése előtt azonosítsák, és a rendelkezésre álló erőforrásokat a legnagyobb kockázatot jelentő hibák megelőzésére vagy felismerésére összpontosítsák.

Az FMEA-t számos iparágban alkalmazzák, többek között a gépiparban, autóiparban, energetikában, vegyiparban, élelmiszeriparban, valamint a komplex gyártási és karbantartási rendszerekben. Alkalmazási területe kiterjedhet egyedi berendezésekre, részrendszerekre, teljes technológiai folyamatokra vagy akár termékek elemzésére is. Különösen jelentős szerepe van olyan környezetben, ahol egy meghibásodás nem csupán egy berendezés kiesését, hanem termelés kiesést, minőségromlást, jelentős gazdasági veszteséget vagy biztonsági kockázatot is okozhat.

A hagyományos FMEA folyamat során az elemzők és a szakértők először meghatározzák a vizsgált rendszer részegységeit és funkcióit, majd azonosítják a lehetséges hibamódokat. Ezt követően meghatározzák

a hibák lehetséges hatásait és következményeit, valamint – az alkalmazott értékelési rendszer alapján – meghatározzák a hibák súlyosságát (Severity, S), előfordulási valószínűségét (Occurrence, O) és felismerhetőségét (Detection, D). E paraméterek alapján különböző kockázati prioritási módszerek alkalmazhatók, például a hagyományos Risk Priority Number (RPN), amely az S, O és D értékek szorzataként határozható meg. Az eredmények alapján a hibamódok [2] rangsorolhatók, és meghatározhatók a szükséges megelőző vagy korrekciós intézkedések.

A digitalizáció és a mesterséges intelligencia fejlődése új lehetőségeket teremt az FMEA egyes lépéseinek támogatására és automatizálására. A műszaki dokumentációk, karbantartási naplók, meghibásodási jelentések és üzemeltetési adatok olyan információkat tartalmazhatnak, amelyek felhasználhatók a potenciális hibamódok azonosítására, azok okainak és hatásainak feltárására, valamint a kockázatok értékelésének támogatására.

Egy megbízhatóbb megközelítés lehet az ember és a mesterséges intelligencia együttműködésére épülő, úgynevezett AI-assisted FMEA rendszer kialakítása. Ebben a megközelítésben az AI az FMEA egyes részfeladatait támogatja, miközben a végső döntés és validáció továbbra is szakértői kontroll mellett történik. Ez különösen fontos olyan kockázatelemzési feladatok esetén, ahol a hibás vagy nem megfelelően indokolt döntés közvetlenül befolyásolhatja a berendezés megbízhatóságát, a termelés folytonosságát vagy a munkabiztonságot.

Jelen kutatás célja ezért egy olyan mesterséges intelligenciával támogatott FMEA-megközelítés vizsgálata [3], amely az FMEA hibamód-meghatározást részben vagy teljesen automatizált módon képes támogatni. A kutatás során nagy nyelvi modellek által generált hibamódokat hasonlítottunk össze szakértői alapon elkészített FMEA-eredményekkel.

2. HIBAMÓDOK MEGHATÁROZÁSA

A kutatás alapkérdése az, hogy mennyire használható megbízhatóan a nagy nyelvi modell a hibamódok meghatározásában [4]. Emellett pedig fontos kérdés az is, hogy a szakértői gárda és a nagy nyelvi modell hogyan tud együtt jól és hatékonyan dolgozni. Mely részleteket lehet és javasolt a mesterséges intelligenciára bízni, melyek maradnak a szakértőknél. [5]

A kutatásban 4 nagy nyelvi modellt vizsgáltunk meg hibamód-meghatározásra.

- Llama 3.1 (8B) [6]
- Mistral:7B-Instruct [7]
- Phi-3:mini [8]
- Qwen2.5:7B-Instruct [9]

Modellek tulajdonságai 1. táblázat

	Llama 3.1 (8B)	Mistral:7B-Instruct	Phi-3:mini	Qwen2.5:7B-Instruct
Paraméterszám	8 milliárd (8B)	7,25 milliárd	3,8 milliárd (3.8B)	7,61 milliárd
Támogatott nyelvek	Többnyelvű	Elsősorban angol	Elsősorban angol	Többnyelvű, több mint 29 nyelv
Legfőbb jellemzők	Fejlett eszközhasználat, kiemelkedő érvelési képesség	Hatékony figyelem-mechanizmus, gyors következtetés	Alacsony erőforrás-igény	Erős kódolási és matematikai képességek, strukturált kimenet generálása

Az FMEA hibamódot már meghatároztuk előtte, tehát egy ismert listának az újra elkészítése a feladat, mindegyik modell esetében.

Ezt a listát vettük alapnak, ehhez képest hasonlítottuk össze a modellek által adott hibamódokat.

Hibamódok modellenként alap motor adatokkal

2. táblázat

Hibamódok	Expert-based	Llama 3.1 (8B)	Mistral: 7B-Instruct	Phi-3: mini	Qwen2.5: 7B-Instruct
Menetzárlat	✓	✓	✗	✗	✓
Testzárlat	✓	✓	✓	✓	✓
Csapágyhiba hirtelen tönkremenetel	✓	✓	✓	✓	✓
Csapágyhiba kezdődő	✓	x	✗	✗	✗
Kontakt hiba pillanatnyi (vezérlés)	✓	✓	✗	✗	✗
Kontakt hiba erőátvitel	✓	✓	✗	✓	✗
Tengelytörés	✓	x	✗	✗	✗
Melegedés túlterhelés	✓	✓	✓	✓	✓
Motorvezérlő hiba	✓	✓	✗	✓	✗
Terepikapsoló hiba	✓	✗	✗	✗	✗
Terepikapsoló hiba kontakt	✓	✗	✗	✗	✗
Kommunikációs hiba	✓	✗	✗	✗	✗
Kommunikációs hiba kéziüzem	✓	✗	✗	✗	✗
PTC hiba megszakad	✓	✗	✗	✗	✗
PTC tiltás (másodlagos melegedés, pl nap)	✓	✗	✗	✗	✗
Kábelhiba	✓	✓	✓	✓	✗
Biztosító betét hiba	✓	✓	✓	✗	✗
Beázás	✓	✗	✓	✓	✓
Hűtés hiba	✓	✓	✓	✓	✓
Túlterhelés	✓	✓	✓	✓	✓
A motor nehezen veszi fel az üzemi fordulatot	✓	✓	✗	✗	✗
A motor hangos és erősebben vibrál, rezeg	✓	✓	✓	✓	✓
Erős súrlódó, érces hang	✓	✗	✓	✓	✗
Használat közben erős bűgás	✓	✗	✓	✓	✗
Terhelés hatására fordulatszám nagy mértékű csökkenése	✓	✓	✗	✗	✗
Tömszelence sérülés	✓	✗	✓	✓	✓
Kapocsház sérülése	✓	✗	✓	✓	✓
Kiegyensúlyozatlanság	✗	✓	✗	✗	✗
Kenési probléma	✗	✗	✗	✓	✓
Alacsony feszültség	✗	✓	✓	✗	✓
Nem megfelelő üzemeltetés	✗	✗	✓	✗	✗
Nem megfelelő súly	✗	✗	✓	✗	✗
Túl magas áramfelvétel	✗	✗	✗	✓	✓
Por bejutása a motorba	✗	✗	✗	✓	✗
Felharmonikus megjelenése	✗	✗	✗	✓	✗
Feszültség kiegyensúlyozatlanság	✗	✗	✗	✓	✗

Hibamódok modellenként alap motor adatokkal és kiterjesztett rendszerrel

3. táblázat

Hibamódok	Expert-based	llama3.1	Mistral	phi3mini	qwen2.5
Menetzárlat	✓	✓	X	X	✓
Testzárlat	✓	✓	✓	✓	✓
Csapágyhiba hirtelen tönkremenetel	✓	✓	✓	✓	✓
Csapágyhiba kezdődő	✓	x	X	X	X
Kontakt hiba pillanatnyi (vezérlés)	✓	✓	X	X	X
Kontakát hiba erőátvitel	✓	✓	X	✓	X
Tengelytörés	✓	x	X	X	X
Melegedés túlterhelés	✓	✓	✓	✓	✓
Motorvezérlő hiba	✓	✓	X	✓	X
Terepikapsoló hiba	✓	X	X	X	X
Terepikapsoló hiba kontakt	✓	X	X	X	X
Kommunikációs hiba	✓	✓	✓	✓	✓
Kommunikációs hiba kéziüzem	✓	X	X	X	X
PTC hiba megszakad	✓	X	X	X	X
PTC tiltás (másodlagos melegedés, pl. nap)	✓	X	X	X	X
Kábelhiba	✓	✓	✓	✓	X
Biztosító betét hiba	✓	✓	✓	X	X
Beázás	✓	X	✓	✓	✓
Hűtés hiba	✓	✓	✓	✓	✓
Túlterhelés	✓	✓	✓	✓	✓
A motor nehezen veszi fel az üzemi fordulatot	✓	✓	X	X	X
A motor hangos és erősebben vibrál, rezeg	✓	✓	✓	✓	✓
Erős súrlódó, érces hang	✓	X	✓	✓	X
Használat közben erős bűgás	✓	X	✓	✓	X
Terhelés hatására fordulatszám nagy mértékű csökkenése	✓	✓	X	X	X
Tömszelence sérülés	✓	X	✓	✓	✓
Kapocsház sérülése	✓	X	✓	✓	✓
Kiegyensúlyozatlanság	X	✓	X	X	X
Kenési probléma	X	X	X	✓	✓
Alacsony feszültség	X	✓	✓	X	✓
Nem megfelelő üzemeltetés	X	X	✓	X	X
Nem megfelelő súly	X	X	✓	X	X
Túl magas áramfelvétel	X	X	X	✓	✓
Por bejutása a motorba	X	X	X	✓	X
Felharmónikus megjelenése	X	X	X	✓	X
Feszültség kiegyensúlyozatlanság	X	X	X	✓	X

3. MODELLEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A modellek által adott adatokat az eredeti listához képest hasonlítottuk össze. A metodika az, hogy True positive (TP), ha mind a kettőnél szerepel, False Positive (FP) csak az AI modell javasolta, False Negative (FN) csak a szakértői listában van.

Ennek eredménye:

Modellek összehasonlítása motor alapadatokkal

4. táblázat

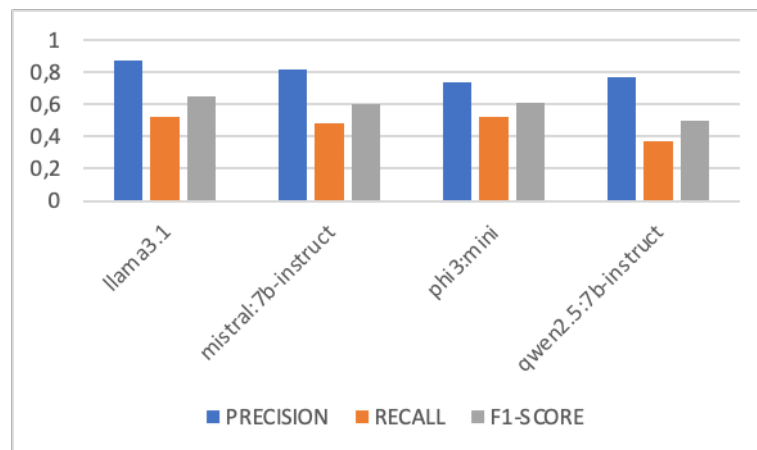
	Llama3.1	Mistral:7b-instruct	Phi-3:mini	Qwen2.5:7b-instruct
TP	14	13	14	10
FP	2	3	5	3
FN	13	14	13	17
TN	7	6	4	6

F1-score-t alkalmazva, az alábbiakat figyelembe véve:

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$$

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$$

$$\text{F1-score} = 2 \times \text{Precision} \times \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall})$$

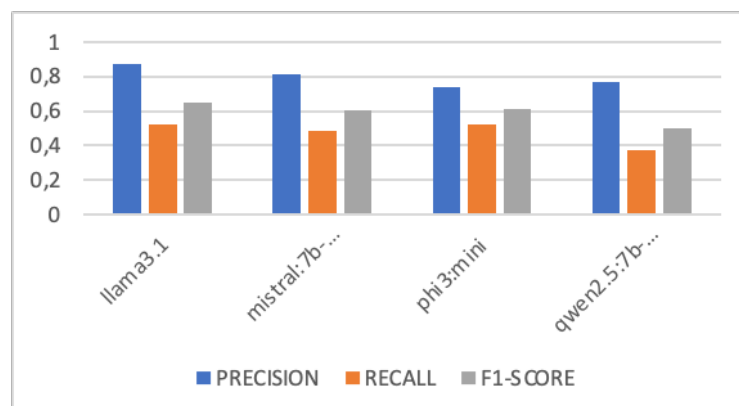


1. ábra. F1-score-ok alapadatokkal

Modellek összehasonlítása motor alapadatokkal és kiterjesztett rendszerrel

5. táblázat

	Llama3.1	Mistral:7b-instruct	Phi3:mini	Qwen2.5:7b-instruct
TP	15	14	15	11
FP	2	3	5	3
FN	12	13	12	16
TN	7	6	4	6



2. ábra. F1-score-ok alapadatokkal és kiegészítéssel

4. KIÉRTÉKELÉS

Az alap motor adatokkal, illetve egy komplett rendszer leírással jól összehasonlítható a kapott válasz.

Ha csak a motor adatokat adjuk bemenetként, akkor összességében a legerősebb az Llama 3.1-es modell. A javaslatának 87%-a szerepel a szakértői javaslatban. Viszont az összes szakértői javaslatnak csak a felét találta meg. Mind a három modell esetében az tapasztalható, hogy jobb értékeket értek el, a sorrend azonban maradt.

Megállapítható az is, hogy a többlet információval nem hoztak létre olyan javaslatot, amely eredetileg ne lett volna benne a szakértői listában.

F1-score alapján a sorrend, csak motor adatokkal: **F1-score alapján a sorrend, a kiegészítő adatokkal:**

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. LLama 3.1. | 1. LLama 3.1. |
| 2. Phi3:Mini | 2. Phi3:Mini |
| 3. Mistral:7b-instruct | 3. Mistral:7b-instruct |
| 4. Qwen 2.5:7b-instruct | 4. Qwen 2.5:7b-instruct |

A gyengébb értékek azzal magyarázhatóak, hogy például a PTC esetében a szakértői listában megjelenik a fals jelzés is. Míg a modellek csak magát a PTC jelzést jelölte meg, mint hiba, visszavezetve egy elégtelen hűtésre vagy elkoszolóadásra. Több olyan hibamód nincs felvéve, ami a szakértők esetében tapasztalatra épülnek.

5. KONKLÚZIÓ, JÖVŐKÉP

A kutatás során azt állapítottuk meg, hogy a vizsgált modellek nem képesek önállóan hibamódokat meghatározni. Leginkább olyan algoritmusként alkalmazható, amely a szakértői feladatokat segíti elő, de minden esetben ellenőrzés szükséges.

A jövőben a kiterjesztett adatokhoz egy adott géptípushoz csatolhatjuk a javítási dokumentumokat, szerelői tapasztalatokat. Amennyiben ebben hasonló leírások szerepelnek, mint a szakértői tapasztalatok, hasonló listát érhetünk el, mint a szakértői lista.

Ezekre az adatokra építve az FMEA további lépéseéhez AI-asszisztens algoritmus kialakítása, amellyel hatékonyabbá, gyorsabbá tehetjük a rendszert.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Qun Wang, Guozhu Jia, Yuning Jia, Wenyan Song, *A new approach for risk assessment of failure modes considering risk interaction and propagation effects*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 216, 2021, 108044, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108044>.
- [2] M. Catelani, L. Ciani, M. Venzi, *Failure modes, mechanisms and effect analysis on temperature redundant sensor stage*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 180, 2018, Pages 425-433, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.08.013>.
- [3] El Hassani I, Masrour T, Kourouma N, Tavčar J. *AI-driven FMEA: integration of large language models for faster and more accurate risk analysis*. *Design Science*. 2025;11:e10. doi:10.1017/dsj.2025.7
- [4] Collier, Z. A., Gruss, R. J., & Abrahams, A. S. (2025). *How good are large language models at product risk assessment?*. *Risk Analysis*, 45, 766–789. <https://doi.org/10.1111/risa.14351>
- [5] Weidong Jin, Tiantian Gai, Jin Fang, Hamido Fujita, Jian Wu, *A group experts-LLMs collaborative decision making method to improve reliability in FMEA risk evaluation*, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 71, Part B, 2026, 104304, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.104304>.
- [6] <https://ollama.com/library/llama3.1:8b> (Utolsó metekintés:2026.09.01.)
- [7] <https://ollama.com/library/mistral:7b-instruct> (Utolsó metekintés:2026.09.01.)
- [8] <https://ollama.com/library/phi3:mini> (Utolsó metekintés:2026.09.01.)
- [9] <https://ollama.com/library/qwen2.5:7b-instruct> (Utolsó metekintés:2026.09.01.)