



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

VÁKUUMOS ÉS SOFT GRIPPER FEJLESZTÉSE, TESZTELÉSE ÉS ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSE ROBOTIKAI MEGFOGÁSI FELADATOKRA

Szerző(k): **Virág Barnabás**
Széchenyi István Műszaki Technikum,
12/F

Spindler Viktor
Széchenyi István Műszaki Technikum,
12/F

Szabó Zsombor
Széchenyi István Műszaki Technikum,
12/G

Czika Martin
Széchenyi István Műszaki Technikum,
12/G

Konzulens(ek): **Zsiga Bence Sándor**
PhD hallgató

Elekes Péter
K+F munkatárs

Székesfehérvár, 2026.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	A két gripper koncepciója és elméleti alapjai	5
2.1	A soft gripper működési elve	5
2.2	A vákuumos gripper működési elve.....	6
2.3	Összehasonlítás és választott alkalmazási területek.....	8
3.	Mechanikai tervezés és felépítés.....	9
3.1	A soft gripper szerkezeti kialakítása	9
3.2	A vákuumos gripper szerkezeti kialakítása.....	9
3.3	Erőátvitel: a bellcrank-elrendezés és mechanikai előny	11
4.	Elektronikai rendszer	12
4.1	A soft gripper elektronikája	12
4.2	A vákuumos gripper elektronikája.....	12
5.	Vezérlőszoftver.....	13
5.1	A soft gripper vezérlési logikája	13
5.2	A vákuumos gripper vezérlési logikája.....	14
6.	Hibaelemzés és mérnöki tanulságok.....	16
6.1	A soft gripper erőátviteli problémája	16
6.2	A vákuumos gripper vázszerkezeti hibája.....	16
6.3	Javítási irányok a 2.0 verzióhoz	17
7.	Mérési eredmények.....	19
7.1	A soft gripper maximális szorítóereje	19
7.2	A soft gripper emelési tesztjei különböző geometriákkal	19

7.3	A soft gripper terhelhetőségi stressz-tesztje.....	20
7.4	A vákuumos gripper elméleti és mért teljesítménye	20
7.5	Ciklusidő-összehasonlítás	21
8.	Értékelés és jövőbeli irányok	22
8.1	A két technológia összehasonlítása	22
8.2	A soft gripper korlátai és fejlesztési irányai.....	22
8.3	A vákuumos gripper korlátai és fejlesztési irányai	23
8.4	Integráció egy CAN-buszos robotikai rendszerbe	23
8.5	Költségvetés	24
9.	Összefoglaló.....	25
10.	Summary.....	26
11.	Irodalomjegyzék	27

1. Bevezetés

A robotika fejlődésével a megfogási technológiák szerepe folyamatosan nő [12]. Egy robotkar értéke nagy részben azon múlik, hogy milyen típusú megfogóval van felszerelve: hiába precíz a kar, ha a megfogó nem tud alkalmazkodni a kezelt tárgy alakjához, súlyához vagy anyagához. A hagyományos, merev pofás (parallel jaw) megfogók egyszerűek és erősek, de sok esetben nem képesek megfelelően kezelni a szabálytalan formájú vagy törékeny tárgyakat.

Az ipari automatizálás egyik fő iránya ma éppen az, hogy a robotok a merev, előre rögzített pályákon történő mozgás helyett egyre rugalmasabb, adaptív rendszerekké váljanak. Egy modern üzemben ritkán fordul elő, hogy ugyanaz a robot minden nap pontosan ugyanazt a feladatot végzi ugyanolyan tárgyakon — sokkal inkább változatos méretű, formájú és anyagú termékek közlekednek a szalagokon. Ennek a változatosságnak a kezelése részben a robotvezérlő szoftveren múlik, részben viszont a mechanikán: a megfogó rendszeren.

Dolgozatunkban két eltérő működési elvű robotmegfogót fejlesztettünk ki és vizsgáltunk meg összehasonlító módon: egy rugalmas anyagú, mechanikus soft grippert és egy vákuumos grippert. A fejlesztés során a mechanikai kialakítás mellett kiemelt figyelmet kapott az áttételi geometria optimalizálása — konkrétan a bellcrank-elrendezés és a mechanikai előny maximalizálása zárt helyzetben. A tesztelés során különböző méretű, alakú és anyagú tárgyak megfogási sikerességét, a szorítóerőt és a tartós üzem alatti viselkedést vizsgáltuk.

A két technológia eltérő elvek alapján működik, más-más tárgytipusokra optimális, és különböző mérnöki kihívásokat rejt. A soft gripper a rugalmas deformációra, a vákuumos megfogó pedig a nyomáskülönbségre épít. Ennek megfelelően az optimalizálási kérdések is mások: a soft grippernél a geometria és az erőátvitel, a vákuumos megfogónál a pneumatikai tömítettség és a mechanikai váz teherbírása a kritikus. Az eredmények alapján konkrét javaslatot teszünk arra, hogy mely feladattípusokhoz melyik megfogó alkalmasabb, és hogyan integrálhatók egy egységes CAN-buszos robotikai rendszerbe.

A projekt során szerzett tapasztalatok túlmutatnak az egyes megfogók működésén:

tanulságos képet adnak arról, hogy a mechanikai tervezés, a 3D nyomtatott alkatrészek anizotróp viselkedése, a pneumatikus erőátvitel és a mikrovezérlő-alapú vezérlés hogyan fonódik össze egy valós robotikai eszközben. Külön érdekes tanulság volt, hogy egy látszólag apró mechanikai geometriai változtatás (a karok hosszarányának módosítása) nagyságrenddel tudja javítani a rendszer teljesítményét — ez azt mutatja, hogy a robotika nem egyszerűen nagyobb motorok kérdése.

A dolgozat a fejlesztés logikai menetét követi. A 2. fejezet a két gripper koncepcióját és elméleti alapjait ismerteti. A 3. és 4. fejezet a mechanikai és elektronikai felépítést mutatja be. Az 5. fejezet a vezérlőszoftvert. A 6. fejezetben ismertetjük a prototípusok során felmerült hibákat és azok mérnöki tanulságait. A 7. fejezet a mérési eredményeket tartalmazza. A 8. fejezet foglalja össze a tapasztalatokat és mutatja be a jövőbeli irányokat, beleértve a CAN-buszos robotikai rendszerbe való integrációt.

2. A két gripper koncepciója és elméleti alapjai

2.1 A soft gripper működési elve

A soft gripper működése a rugalmas deformáción alapul [1]. Az ujjai nem merevek, hanem képesek alakváltozásra, így a megfogott tárggyal nagyobb felületen érintkeznek. Ez több előnnyel jár egyszerre: jobb tapadás, kisebb sérülésveszély a tárgyra, és nagyobb alkalmazkodóképesség a szabálytalan formákhoz.

A klasszikus, merev pofás (parallel jaw) megfogókhoz képest a rugalmas ujj egyfajta „puha párnaként” viselkedik. Amikor a tárgyat megfogja, az ujj először érintkezik a tárgy felületével, majd a további zárási mozgás az ujjat deformálja — nem a tárgyat. Ez azért fontos, mert egy merev megfogónál a zárási erő direkt módon a tárgyra hat, és nagy erő esetén könnyen tönkretesz egy törékeny objektumot. A rugalmas ujj viszont „emészti” az extra erőt, miközben stabil tapadást biztosít.

A természetben is megtaláljuk ennek az elvnek az analógiáját: egy majom vagy egy ember keze sem merev, az ujjak rugalmasan idomulnak a megfogott tárgyhoz. A robotikai soft gripperek ezt a biológiai inspirációt követik [2]. A soft robotics területén más érdekes megoldások is léteznek, mint például a jamming grippers, ahol granuláris anyag (pl. kávé a rugalmas tasakban) vákuumozással merevíthető a tárgy körül [3] — ezek azonban egy külön kutatási irányt képviselnek, amit dolgozatunk nem tárgyal.

A mi kialakításunkban (1. ábra) a rendszer mechanikusan záródik egy lineáris motor segítségével, amely áttételen keresztül mozgatja az ujjakat. Az ujjvégek rugalmas TPU anyagból készülnek, és a megfogás során a tárgy alakját követik [16]. Ez a koncepció különösen jól működik szabálytalan, gömbölyű vagy enyhén deformálódó tárgyakkal — nagyjából ott, ahol egy merev parallel jaw gripper kudarcot vallana.



1. ábra Kép a soft gripper 3D tervéről

2.2 A vákuumos gripper működési elve

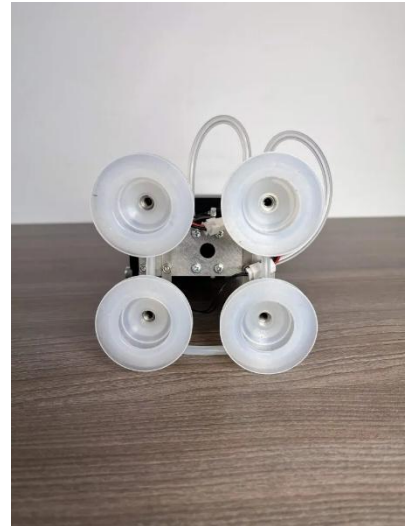
A vákuumos gripper ezzel szemben egészen más elven működik: a környezeti légnyomás és a tapadókorong alatt kialakított parciális vákuum közötti nyomáskülönbség tartja a tárgyat [4]. A tapadókorong és a tárgy felülete közötti zárt légtérben a pumpa kiszívja a levegőt, a külső atmoszféra pedig ellentétes irányban nyomást fejt ki — ez a két erő egyensúlya tartja össze a korongot és a tárgyat.

Az elméleti tartóerő képlete: $F = n \cdot A \cdot \Delta P \cdot \mu$, ahol n a tapadókorongok száma, A az egy korong effektív felülete, ΔP a nyomáskülönbség, μ pedig egy biztonsági és súrlódási együttható. A függőleges emelésnél a μ szerepe kritikus: ez fejezi ki, hogy az elméleti maximumhoz képest mennyit tud ténylegesen tartani a rendszer a szivárgások, a felületi egyenetlenségek és a dinamikus hatások miatt. Ipari gyakorlatban μ értéke 0,5 körül van függőleges emelésnél, vízszintes elrendezésnél (ahol a súly nem közvetlenül a vákuumerő ellen dolgozik) 0,25 is elég lehet.

A mi rendszerünkben négy darab 50 mm átmérőjű szilikon tapadókorong van, egy-egy korong effektív felülete $A \approx 19,63 \text{ cm}^2$ ($r^2 \cdot \pi$). Ha a pumpák -0,5 bar (50 kPa) nyomáskülönbséget tudnak előállítani, akkor az elméleti maximális emelőerő $F = 4 \cdot 0,001963 \text{ m}^2 \cdot 50\,000 \text{ Pa} \approx 392,6 \text{ N}$, ami elméletben kb. 40 kg emelését tenné lehetővé. A gyakorlati teherbírás azonban a dinamikus hatások és a szivárgások miatt 2-es biztonsági faktorra 20 kg-ban lett limitálva.

Érdeemes megemlíteni, hogy a nyomáskülönbség mértéke a tengerszint feletti magassággal is változik: a tengerszinten az atmoszferikus nyomás 101,3 kPa, tehát elméletileg a maximum elérhető ΔP kb. 101 kPa (ha a pumpa teljes vákuumot hozna létre). A mi pumpáink ennek kb. felét tudják (50 kPa), ami kereskedelmi vákuumpumpáknál tipikus érték. Ipari szintű pumpákkal (pl. Schmalz vagy Festo termékekkel) elérhető a 80–90 kPa is, de ezek ára egy diákprojekt keretét messze meghaladja.

Ez a technológia (2. ábra) a sík felületű, sérülékeny vagy porózus tárgyakkal jelent komoly előnyt: egy karton- vagy üvegdoboz emelése vákuummal gyorsabb és kíméletesebb, mint bármilyen mechanikus megfogóval.



2. ábra Vákuum tappancsok

A szilikon tapadókorong ráadásul egyenetlen felületeken is tud tömíteni, mert a rugalmas anyag kitölti a mikroszkopikus réseket [18]. Hátrányai: porózus anyagokon (textília, hab) gyakorlatilag nem működik, mert a pumpa képtelen fenntartani a nyomáskülönbséget; emellett a pneumatikus rendszer kialakítása lényegesen bonyolultabb, mint egy mechanikus megfogóé.

2.3 Összehasonlítás és választott alkalmazási területek

A táblázatban (1. táblázat) látható anyagválasztás a funkcionális elkülönítés elvét követi: minden komponens olyan anyagból készül, amely az adott szerepkörben optimális tulajdonságokkal rendelkezik, ahelyett hogy egyetlen kompromisszumos anyagot használnánk az egész szerkezethez. A merev PLA/PETG váz és a rugalmas TPU ujjvég kontrasztja a legfontosabb: a váznak alaktartónak kell lennie a megfogási erők átvitelére, míg az ujjvégnek deformálnia kell a tárgy felületéhez való illeszkedéshez. Az acél tengelyek és a miniatűr golyóscsapágyak a csuklópontoknál a tartósságot és a súrlódásmentes mozgást biztosítják, amit polimer alkatrészekkel hosszú távon nem lehetne fenntartani.[9][11]

Szempon	Soft gripper	Vákuumos gripper
Optimális tárgytípus	Szabálytalan, gömbölyű	Sík, sima felületű
Max szorítóerő (gyakorlati)	~38,5 N	~200 N (20 kg limit)
Sebesség (elengedés)	Lassú (motoros)	Nagyon gyors (szelep)
Mechanikai komplexitás	Közepes	Magas (pneumatika)
Tárgykárosodási veszély	Nagyon alacsony	Alacsony (sima felületen)

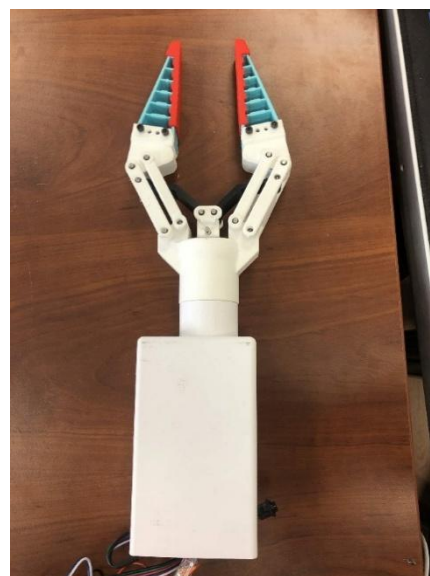
1. táblázat A két gripper-konceptió összehasonlítása.

3. Mechanikai tervezés és felépítés

3.1 A soft gripper szerkezeti kialakítása

A soft gripper (3. ábra) kétujjas kialakítású, ami stabil, többpontos megfogást tesz lehetővé. A főbb alkatrészek: a merev váz, két mozgó ujj csuklópontokkal, és a hajtómechanizmus, amely a lineáris motor mozgását átviszi az ujjakra. Az ujjak enyhén ívelt formájúak — ez segíti a tárgy körülfogását.

Az anyagválasztást a különböző szerepekhez optimalizáltuk: a vázhoz PLA vagy PETG (mindkettő 3D nyomtatható, megfelelően merev), az ujjvégekhez TPU (rugalmas, jó tapadás), a tengelyekhez acél, a csuklópontokhoz miniatűr golyóscsapágy [20]. A TPU kulcsfontosságú: ez adja a rugalmasságot és a tapadási felületet.



3. ábra Soft gripper szerkezete

Alkatrész	Anyag	Szerep
Váz	PLA / PETG	Merev szerkezet
Ujjak vége	TPU	Rugalmas tapadófelület
Tengelyek	Acél	Csuklópontok rögzítése
Csapágyak	Miniatűr golyóscsapágy	Súrlódásmentes mozgás

2. táblázat A soft gripper anyagválasztása.

3.2 A vákuumos gripper szerkezeti kialakítása

A vákuumos megfogó rendszere egy 20 kg-os névleges teherbírásra méretezett készletre épül [5]. A fő komponensek: négy darab 50 mm átmérőjű szilikon tapadókorong (a szilikon azért jó választás, mert egyenetlen felületeken is tömít, és rugalmasságát széles hőmérséklet-tartományban megőrzi), rugós-teleszkópos felfüggesztés (ami kompenzálja a robotkar pozícionálási pontatlanságát Z-tengely mentén, és megvédi a munkadarabot az ütközéstől), két darab nagy teljesítményű vákuumpumpa, és egy háromutas elektronikus

szelep a gyors elengedéshez.

A teleszkópos felfüggesztés értékét nem szabad alábecsülni. Egy robotkarral történő megfogásnál a Z-tengelyű pozícionálási pontatlanság tipikusan 1-3 mm is lehet (ez a robotkar precizitásától függ). Ha a megfogófejet mereven rögzítjük a karhoz, akkor a túlnyomó erővel történő „ráérkezés” vagy eltöri a tapadókorongot, vagy megsérti a munkadarabot. A teleszkópos, rugós tag ezt a többletmozgást elnyeli: amikor a korong érintkezik a tárggyal, a rugó összenyomódik, és a robotkar tovább mozoghat anélkül, hogy további terhelés érné a megfogást.

A vázszerkezet Shapr3D-ben lett megtervezve [17], FDM (Fused Deposition Modeling) 3D nyomtatáshoz. A tervezés fő szempontjai: az integrált csővezetés (a 300 mm-es szilikon csövek rendezett elhelyezése, rövidítése, hogy ne akadjanak be a robotkar mozgásánál), a súlyoptimalizálás (üreges, de merevítő bordákkal ellátott váz a robotkar dinamikájának megőrzéséhez — minél kisebb a megfogó saját súlya, annál nagyobb a tényleges hasznos teherbírás), és a szerelhetőség (az Arduino Nano és a vezérlőmodulok rögzítési pontjainak kialakítása).

A pneumatikus rendszer (4. ábra) kétkörös: egy szívó és egy lefúvató ágból áll. A szívó ág tartalmazza a pumpákat és az egyirányú szelepet, amely megakadályozza, hogy a pumpa leállásakor a levegő visszaáramoljon és elveszítsük a vákuumot. A lefúvató ág a háromutas elektronikus szelepen keresztül csatlakozik a külső légkörhöz — ez az ág aktiválódik elengedéskor.



4. ábra Vákuum gripper élőben

3.3 Erőátvitel: a bellcrank-elrendezés és mechanikai előny

A soft gripper első változatánál a szorítóerő elégtelen volt. A hibakeresés során kiderült, hogy a geometria volt a baj: a kimenő kar (ami az ujjakat zárja) túl hosszú volt a bemenő karhoz (amelyen a lineáris motor dolgozik) képest, ezért a motor nyomatéka nem transzformálódott elég erős szorítássá.

A megoldáshoz egy klasszikus mechanikai elrendezést választottunk: a bellcrank (L-alakú kétkarú emelő). A bellcrank egy olyan csuklós kar, ahol a bemenő és a kimenő kar egymással szöget zár be, és a közös csuklópont körül forog. Ennek előnye, hogy a mechanikai előny (az erőátvitel aránya) a karhosszok arányával egyszerűen szabályozható [8]: ha a bemenő kart hosszabbra, a kimenőt rövidebbre méretezzük, a motor viszonylag kisebb húzóereje is nagy szorítóerővé transzformálódik az ujjon.

Egy fontos finomhangolási szempontot is figyelembe vettünk: a mechanikai előny nem állandó a mozgás során, hanem a kar szögétől függ. A mi elrendezésünkben a kinematikát úgy méreteztük, hogy a maximális mechanikai előny éppen a megfogás utolsó fázisában — a zárt helyzet közelében — jelenjen meg. Ez pontosan ott ad plusz erőt, ahol a legnagyobb szükség van rá: amikor az ujj már érintkezik a tárggyal és a szorítás fokozódik. Az ujj gyorsan zárul (kis mechanikai előny, de nagy sebesség a záródási fázis elején), majd a végén lassulva, de erős szorítással „ráharap” a tárgyra.

A módosítások (a bemenő kar hosszának növelése, a kimenő kar csökkentése, és a kinematika optimalizálása a zárt helyzetre) eredményeként a szorítóerő jelentősen megnövekedett (a pontos adatokat a 7.1. alfejezet tartalmazza). Ez a tanulság általánosabb értelmű: egy robotikai megfogónál a nyers motorerő önmagában nem elég — a mechanizmus geometriáján és kinematikáján múlik, hogy ez az erő ténylegesen megérkezik-e a megfogási pontig, és a folyamat melyik szakaszában.

4. Elektronikai rendszer

4.1 A soft gripper elektronikája

A soft gripper vezérléséhez egy egyszerű, de megbízható rendszer készült. A fő komponensek: Arduino Nano mikrokontroller [14], Cytron motorvezérlő a lineáris motorhoz [6], két nyomógomb (nyitás és zárás), és 12 V-os tápegység. A rendszer tápfeszültség-tartománya 7,4 V és 12 V között van.

A bekötés minimális: D4 láb az irány (DIR), D5 a PWM vezérlés, D2 a nyitó gomb, D3 a záró gomb. Minden komponens közös földre van kötve. Az első prototípus során egy fontos tapasztalatot szereztünk: az Arduino és a motorvezérlő földelését (GND) össze kell kötni, különben a rendszer bizonytalanul működik vagy teljesen leáll. Ez a klasszikus földelési hiba, amelybe sok kezdő belefut.

4.2 A vákuumos gripper elektronikája

A vákuumos rendszer vezérlését szintén Arduino Nano mikrokontroller végzi [7]. A pumpák és a szelepek nagy áramfelvétele miatt azonban nem lehet közvetlenül az Arduino lábakról hajtani őket — két PWM digitális elektronikus kapcsolót építettünk be, amelyek galvanikusan leválasztják a logikai kört a teljesítménykörtől. Ez két szempontból is fontos: megóvja a mikrokontrollert az induktív terhelések bekapcsolásakor keletkező feszültségtüskéktől, és lehetővé teszi, hogy a pumpák külön tápfeszültségen működjenek.

A pneumatikus rendszer két körből áll: egy szívó ág és egy lefúvató ág. A háromutas elektronikus szelep kulcseleme a gyors elengedésnek — amikor a „Kiengedés” gombot megnyomjuk, a szelep a zárt vákuumkört összenyitja a külső légkörrel, így a negatív nyomás azonnal kiegyenlítődik. Ez nagyságrendekkel gyorsabb elengedést tesz lehetővé, mintha csak a pumpát állítanánk le és várnánk, hogy a szivárgás kiegyenlítse a nyomást.

5. Vezérlőszoftver

5.1 A soft gripper vezérlési logikája

A soft gripper manuális vezérléssel működik, két nyomógomb segítségével: az egyik a nyitás, a másik a zárás. Ha egyik sincs nyomva, a motor leáll. A szoftvernek (5. ábra) néhány biztonsági szempontot kell betartania: nem működhet egyszerre két irány (ez égetné a motorvezérlőt), a motornak biztonságosan meg kell állnia, és nem szabad feleslegesen terhelni. A kód Arduino IDE-ben készült [15], minimális függőségekkel.

```

#define PWM 5
#define DIR 4
#define BTN_EXTEND 2
#define BTN_RETRACT 3
void setup() {
  pinMode(PWM, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);

  pinMode(BTN_EXTEND, INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_RETRACT, INPUT_PULLUP);

  digitalWrite(PWM, LOW);
}
void loop() {

  bool extendPressed = digitalRead(BTN_EXTEND) == LOW;
  bool retractPressed = digitalRead(BTN_RETRACT) == LOW;
  // KINYOM
  if (extendPressed && !retractPressed) {
    digitalWrite(DIR, HIGH);
    analogWrite(PWM, 255);
  }
  // BEHÚZ
  else if (retractPressed && !extendPressed) {
    digitalWrite(DIR, LOW);
    analogWrite(PWM, 255);
  }
  // STOP
  else {
    analogWrite(PWM, 0);
  }
}

```

5. ábra Soft gripper programkódja

5.2 A vákuumos gripper vezérlési logikája

A vákuumos rendszer szoftvere érdekes módon a Servo.h könyvtárat használja — nem azért, mert szervókat vezérlünk, hanem mert az alkalmazott digitális elektronikus kapcsolók a standard szervójelet (50 Hz, 1–2 ms impulzusszélesség) értelmezik vezérlőjelként. Ez egy meglepő, de hatékony megoldás: a kapcsoló a szervójel 1 ms-os impulzusát (vagyis 0°) kikapcsolt, a 2 ms-ost (180°) bekapcsolt állapotként kezeli. Így a pumpák és szelepek bináris vezérlése kényelmesen integrálható az Arduino-ba egy jól bevált, stabil könyvtár segítségével.

A vezérlési ciklus (6. ábra) három fázisra bontható. A beszívási fázisban a gomb megnyomásakor a pumpa maximális kitöltési tényezővel indul, a szelep zárva marad, és a rendszer 2 másodpercig kényszerített szívást alkalmaz a stabil vákuum kialakulásához. A tartási fázisban a pumpa leállítható — a kód a pneumatikus rendszer zártságára hagyatkozik, a háromutas szelep alaphelyzete megtartja a vákuumot. Ez energiatakarékos megoldás, hiszen a pumpa nem fogyaszt áramot, amikor épp csak tartani kell a már kialakult vákuumot. A kiengedési fázisban a második gomb aktiválja a szelepet, ami megszünteti a vákuumot és kiegyenlíti a belső nyomást a környezettel, így a tárgy azonnal elengedésre kerül.

```

1  if (gombBeszivAllapot == LOW && gombBeszivKorabbi == HIGH) {
2      pompa.write(180); // Pumpa indítása max. teljesítményen
3      szelep.write(0);  // Szelep zárása a vákuum megtartásához
4      delay(3000);     // 3 mp-es kényszerített szívás
5      pompa.write(0);  // Energiatakarékos: zártság tartja a vákuumot
6  }

```

6. ábra Részlet a vezérlő algoritmusból

A szoftverben implementált prellmentesítés (debounce) biztosítja, hogy a nyomógombok mechanikus rezgései ne generáljanak téves parancsokat. A prellmentesítés úgy működik, hogy egy gombnyomás detektálásakor a program megvárja, hogy a jel stabilan ugyanabban az állapotban maradjon egy minimum időn át (tipikusan 20-50 ms), és csak utána tekinti érvényes eseménynek. Enélkül egy olcsóbb gomb akár 5-10 „nyomást” is jelezne egyetlen valódi megnyomás helyett, ami a robotnál komoly problémát okozna.

A kényszerített 2 másodperces szívási ciklus szintén fontos mérnöki döntés: ez biztosítja, hogy a pumpának legyen elegendő ideje a csövekben és a korongok alatt lévő levegő kiritkítására, mielőtt a rendszer statikus állapotba kerül. A kb. 300 mm-es szilikon csövek és a négy korong alatti tér nem tölthető ki légmentesen néhány tized másodperc alatt — ha túl korán lépnénk tovább, a rendszer nem tudná megtartani a terhet. Ez az idő kísérletileg lett hangolva: rövidebb cső- vagy nagyobb pumpa-teljesítmény esetén csökkenthető.

6. Hibaelemzés és mérnöki tanulságok

Mindkét prototípus fejlesztése során több olyan hibát is tapasztaltunk, amelyek fontos mérnöki tanulságokkal szolgáltak. Ezek a hibák nem kudarcok, hanem annak a részei, ahogyan egy valódi fejlesztés halad.

6.1 A soft gripper erőátviteli problémája

Az első változat nem produkálta a várt szorítóerőt. A hibakeresés során kiderült, hogy a geometria volt a baj: a kimenő kar túl hosszú volt a bemenőhöz képest, ezért a motor nyomatéka nem transzformálódott elég erős szorítássá. A bemenő kar növelésével és a kimenő rövidítésével az erő jelentősen megnőtt. Tanulság: egy hajtómechanizmus kiszámítása nem ér véget a motor kiválasztásával — a mechanikai előnyt (mechanical advantage) is figyelembe kell venni.

6.2 A vákuumos gripper vázszerkezeti hibája

A vákuumos prototípus kritikus meghibásodást szenvedett a tesztek során: a négy 50 mm-es korong által kifejtett kb. 400 N erő meghaladta a 3D nyomtatott vázszerkezet teherbírását. A váz két pontján engedett. Az egyik az anyagfáradás a csavarfuratoknál — a koncentrált feszültség miatt a PLA/PETG anyag megrepedt a csavarfejek mentén. A másik a rétegszétválás (delamination): a vákuum által generált húzóerő merőleges volt a nyomtatási rétegekre, ami az FDM nyomtatott alkatrész leggyengébb pontja.

A hiba gyökere a PETG-HF anyag anizotrópiája [9, 11]. Ez a filament kiváló nyomtathatósággal és jó ütésállósággal rendelkezik, de az FDM technológia miatt az alkatrész irányfüggő: a rétegek közötti tapadás (Z-tengely irány) jelentősen gyengébb, mint a szálirányú szilárdság. Tipikus értékek szerint a PETG szálirányú szakítószilárdsága 45–50 MPa, míg a rétegek közötti csak 25–35 MPa — tehát a gyengébbik irány kb. 40-50%-kal kevesebbet bír. Amikor a terhelés iránya merőleges a rétegekre (azaz a rétegeket „szét akarja feszíteni”), ez a gyengébbik érték érvényesül.

A 400 N húzóerő folyamatos igénybevételét az anyag creep (kúszás) formájában is elkezdte megválaszolni. A creep egy olyan jelenség, amelynél a műanyag még a

szakítószilárdsága alatti tartós terhelésre is fokozatosan deformálódik, és a végén tönkremegy. A PETG-nél ez szobahőmérsékleten is megfigyelhető, ha az állandó feszültség eléri a szakítószilárdság 50-60%-át [10]. A mi esetünkben ez a folyamat a csavarfuratokban indult el, majd a feszültségi csúcspontoknál repedés indult.

A hiba másik fontos oka a feszültségkoncentráció volt. Amikor egy csavar húzza egy műanyagalkatrész furatát, a feszültség nem egyenletesen oszlik el — a csavarfej körüli kis felületen koncentrálódik. Ezt az elméletben a K_t (stress concentration factor) számmal írják le [8], ami csavarfuratoknál akár 3-4 is lehet. Ez azt jelenti, hogy ha a névleges feszültség 15 MPa lenne (a csavarerőt a teljes keresztmetszetre osztva), a csúcson 45-60 MPa ébred — ez pedig már a PETG szakadási szintje.

A legfontosabb tanulság: vákuumos megfogóknál nem csak a payload (a felemelt tárgy súlya) számít, hanem a reakcióerő is, ami a vázat feszíti. Mivel a 4 korong elméleti tartóereje eléri a 400 N-t, a váz csatlakozási pontjait legalább 2,5-szeres biztonsági faktoriall kellene méretezni az FDM technológia anizotróp tulajdonságait figyelembe véve.

6.3 Javítási irányok a 2.0 verzióhoz

A vákuumos rendszerhez három konkrét mérnöki módosítást terveztünk be a következő iterációhoz.

Először: hibrid vázszerkezet. A teherviselő elemeknél 3D nyomtatott műanyag helyett alumínium merevítőlemezek kerülnek a kritikus pontokba. Az alumínium szakítószilárdsága (tipikus 6000-es sorozatú ötvözetnél 250-310 MPa) nagyságrenddel nagyobb, mint a PETG-é (45-50 MPa szálirányban), így ugyanakkora terhelés mellett lényegesen kisebb keresztmetszetet igényel. A műanyag megmarad a nem teherviselő burkoló- és rögzítő szerepében, ahol a súly és a könnyű gyárthatóság fontosabb a szilárdságnál.

Másodszor: a nyomtatási orientáció módosítása. Az alkatrészeket úgy kell újratervezni, hogy a fő terhelési irány a rétegekkel párhuzamos legyen, ne pedig merőleges — ezzel kihasználható a szálirányú szakítószilárdság. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az eredeti rajzokat szinte minden alkatrésznél újra kell pozicionálni a nyomtatóban, és sok

esetben a nyomtatás utáni kézi támasztékeltávolítás is másképp néz ki. A slicer szoftverben (tipikusan Cura, PrusaSlicer) az orientációt az erőfolyam-elemzés alapján választjuk meg.

Harmadszor: a csavarkötéseknél nagy felületű fém alátéteket használunk. Ezek elosztják a pontszerű terhelést egy nagyobb felületre, így csökkentik a Kt feszültségkoncentrációs faktort. A gyakorlati ajánlás: a használni kívánt csavarfej átmérőjének legalább kétszeresére méretezzük az alátétet. Ezzel a csavarfej körüli feszültségcsúcs a felére csökkenthető.

A vázgeometriát is érdemes újragondolni az erőfolyam-optimalizálás elve szerint. Ideálisan olyan szerkezet kell, ahol a vákuumerő nem a csavarkötéseket „húzza szét” (húzóigénybevétel), hanem nyomóigénybevételt kelt a vázelemek között — mert a műanyag nyomóterhelésre sokkal ellenállóbb, mint húzóra. Egy klasszikus példa: ha egy híd pillért húzóerő feszít, akkor kábeleket használunk (húzás), ha viszont nyomás van, akkor kőoszlopokat — ugyanez az elv érvényes a műanyag alkatrészek tervezésében is. A teljes újratervezés során érdemes a biztonsági faktort (SF = Safety Factor) 2,5-szörösre méretezni. Az FDM 3D nyomtatás anizotróp jellege és a tesztelhetetlenül sok gyártási változat (nyomtatási hőmérséklet, extrudálási sebesség, lehülési sebesség) indokolja ezt a konzervatív közelítést [19]. Egy precíziós gyártott fém alkatrésznél 1,5-szörös SF is elég lenne.

7. Mérési eredmények

7.1 A soft gripper maximális szorítóereje

A szorítóerő mérésére egy digitális konyhai mérleget helyeztünk a pofák közé, majd maximális kitöltési tényező (PWM 255) mellett zártuk a grippert. A mért tömeg 3,5–4 kg között ingadozott a mérések során. Ebből az $F = m \cdot g$ összefüggéssel számolva a rendszer kb. 38,5 N szorítóerő kifejtésére képes. Ez az érték a mechanikai optimalizálás utáni állapotot tükrözi — az első prototípusnál jelentősen alacsonyabb volt.

7.2 A soft gripper emelési tesztjei különböző geometriákkal

Három különböző formájú tárgyat emeltünk fel 10 cm magasba, és 5 másodpercig tartottuk. Minden tárggyal 5 kísérletet végeztünk.

Tárgy típusa	Jellemző méret	Sikeres emelés	Sikerességi ráta
Kocka	5 cm	5/5	100%
Gömb	4 cm átmérő	5/5	100%
Henger	3 cm átmérő	3/5	60%

3. táblázat A soft gripper emelési tesztjeinek eredményei

A kocka és a gömb esetén a kétujjas kialakítás és a TPU ujjvégek (7. ábra) tökéletesen körbefogták a tárgyat. A henger esetén a kis átmérő és a függőleges állás miatt a megfogási felület kisebb volt, ami két esetben a tárgy megcsúszásához vezetett. Ez arra világít rá, hogy a kisebb átmérőjű hengeres testeknél a szorítóerő mellett a pozicionálás is kritikus.



7. ábra Kép az ujjakról

7.3 A soft gripper terhelhetőségi stressz-tesztje

A tíz másodperces tartás + rángatás teszt sorozatban a gripper határait kerestük (4. táblázat).

Tárgy	Tömeg	Eredmény
Telefon	201 g	100% siker, stabil tartás
Poroltó	700 g	100% siker
Üdítős palack	1 558 g	Sikeres emelés és tartás rángatás mellett is
Vizes palack	1 671 g	Sikeres emelés és tartás
Vasrúd	2 000 g	Félig sikeres — 10 mp után kicsúszott

4. táblázat A soft gripper stressz-tesztjének eredményei.

A vasrúd esetén a felemelés még sikerült, de a 10 másodperces rángatás végén a sima fémfelület és a nagy tömeg kombinációja miatt a tárgy kicsúszott. Ez a teszt jól elválasztja a sikeres és a határeset-alkalmazásokat: a megfogó ~1,5 kg-os ipari vagy háztartási tárgyakkal magabiztosan dolgozik, 2 kg felett a felület jellegétől (érdesség, súrlódás) is függ az eredmény.

7.4 A vákuumos gripper elméleti és mért teljesítménye

A négy darab 50 mm-es korong elméleti maximális tartóereje ideális feltételek mellett (légmentes tapadás, -0,5 bar pumpa-teljesítmény, kemény és sima felület) kb. 392,6 N. A gyakorlati maximális terhelhetőséget 2-es biztonsági faktorial 20 kg-ra (196 N) terveztük. Az összes mérést kiegyensúlyozott lapos felületen 3 másodperc folyamatos vákuum mellett végeztünk.

Biztonsági-, és tárgyi megkötések mellett 10,4 kg-ot tudott megtartani, de ez nem a limit. A részleges mérések alapján a kifejlesztett rendszer elegendő szívóerőt állít elő ahhoz, hogy a saját vázát is megrongálja, tehát a pneumatikus rész jól működött — a szűk keresztmetszet a mechanikai váz lett.

Egyéb mérések mutatják, hogy egy 1kg-os fém lapot 47 másodpercig tudott egyhelyben tartani. Viszont 5kg-ot 15 másodpercig, ami mutatja, hogy nem egyenes arányosság van a súly és idő között.

Kemény, sima felületre történő tapadásnál a rendszer 3-4 másodperc alatt érte el a stabil

vákuumot (ez a pumpák teljesítményétől és a csőhossztól függ). Ez a kényszerített szívási idő beépült a szoftverbe is (lásd 5.2. alfejezet), biztosítva, hogy a rendszer ne próbálja emelni a tárgyat, mielőtt a vákuum kialakulna.

7.5 Ciklusidő-összehasonlítás

Egy ipari alkalmazásban a megfogási és elengedési ciklusidő kritikus paraméter — egy szalag melletti pakológép sebessége nagy részben ezen múlik. Ezt a részletet a két technológia között is kvantitatívan lehet összehasonlítani.

A soft gripper ciklusa a motor sebességétől függ (5. táblázat). A jelenlegi rendszerben a maximális PWM-en (255) a teljes zárási idő kb. 1,8-2,2 másodperc, az elengedés (nyitás) szintén hasonló nagyságrendű. A motoros megoldás hátránya, hogy a nyitási sebességet nem lehet arbitrárisan gyorsítani: a motor és a mechanika együttes tehetetlensége korlátot szab.

A vákuumos gripper ciklusa két fázisra bontható. A beszívási idő (a pillanat, amikor a gomb megnyomásra kerül, a stabil vákuum kialakulásáig) kb. 2 másodperc a jelenlegi pumpaméretnél. Az elengedési idő viszont szelepvezérelt, így nagyságrendekkel gyorsabb: a szelep kinyitásakor a vákuum 0,2-0,3 másodperc alatt megszűnik (ez a csőhossz és a szelep átmérőjének függvénye). Tehát bár a beszívás hasonló nagyságrendű, mint a soft gripper zárása, az elengedés 5-10-szer gyorsabb.

Fázis	Soft gripper	Vákuumos gripper
Megfogás (zárás / beszívás)	~2,0 s	~2,0 s
Elengedés (nyitás / lefúvatás)	~2,0 s	~0,3 s
Teljes ciklus	~4,0 s	~2,3 s

5. táblázat A két gripper ciklusidő-összehasonlítása (becslés részleges adatok alapján).

8. Értékelés és jövőbeli irányok

8.1 A két technológia összehasonlítása

A tapasztalatok alapján mindkét gripper-típus megtalálta a saját alkalmazási területét. A soft gripper egyszerű felépítésű, alacsony költségű és jól alkalmazkodik — szabálytalan, gömbölyű vagy enyhén deformálódó tárgyakkal, törékeny objektumokkal, változó környezetben ez a nyerő koncepció. A vákuumos gripper ezzel szemben sík, sima felületeknél verhetetlen: sokkal nagyobb erőt tud kifejteni, és az elengedés sebessége nagyságrendekkel jobb (szelepvezérelt, nem motoros).

Egy ipari alkalmazásban a két megközelítés nem kizáró, hanem kiegészítő: egy vegyes megfogási feladatnál (pl. különböző dobozok és szabálytalan termékek kezelése) egy kettős megfogó, amelyen mindkét technológia jelen van, lényegesen rugalmasabb, mint egy monolitikus megoldás [13].

Az alábbi döntési mátrix (6. táblázat) konkrét feladattípusokra mutatja, melyik megfogó jobb választás. A táblázatot a saját tesztjeinkből és az irodalmi ajánlásokból állítottuk össze.

Feladat	Ajánlott megfogó	Indok
Kartondoboz palettázás	Vákuumos	Sík felület, gyors elengedés kell
Gyümölcsök rakodása	Soft gripper	Sérülékeny, szabálytalan alak
Üvegtábla kezelés	Vákuumos	Sima, merev, törékeny
Kábelek, drótok	Soft gripper	Rugalmas, hosszúka forma
Fémalkatrészek összeszerelés	Soft gripper	Precíz pozicionálás, változó méret
Csomagolt élelmiszer (zsák)	Vákuumos	Lapos csomag, gyors átrakás
Szerszámok, műszerek	Soft gripper	Változatos forma, biztos fogás
Üvegpalackok (sima test)	Vegyes	Mindkét technológia működik

6. táblázat Döntési mátrix — mely feladathoz melyik megfogó.

8.2 A soft gripper korlátai és fejlesztési irányai

A jelenlegi rendszer korlátai: a szorítóerő a motor mechanikai határai miatt nem növelhető tovább, nincs erő- vagy pozícióvisszacsatolás (tehát a szoftver „vakon” zárja

az ujjakat), és a működés tisztán manuális. A fejlesztési irányok ennek megfelelően több ágon futnak.

Hardveresen: erősebb motor, erő- és pozíciószenzorok beépítése, hogy a megfogó „érezze” a tárgyat. Szoftveresen: automatikus fogási algoritmus, amely a szenzorjelek alapján határozza meg a megfelelő szorítóerőt, és erőszabályozás a túl nagy erőből adódó tárgyrongálás elkerülésére. Rendszerintegráció szempontjából: csatlakoztatás egy robotkarhoz és CAN busz kommunikáció a magasabb szintű vezérléssel.

8.3 A vákuumos gripper korlátai és fejlesztési irányai

A vákuumos rendszer legnagyobb korlátja jelen állapotában a mechanikai váz gyengesége (lásd 6.2. alfejezet). A 2.0 verzió első feladata a hibrid vázszerkezet elkészítése, ami után tervezhetővé válik a tényleges teherbírás és a ciklusidő mérése.

További fejlesztési irányok: nyomásérzékelő beépítése a vákuumkörbe (így a rendszer vissza tudja jelezni, ha elvesztette a tapadást), automatikus fogási szekvencia (gomb helyett egy robotkar-parancs váltja ki), és energetikai optimalizálás — a jelenleg két pumpa sok energiát fogyaszt, egy-pumpás változat nagyobb szeleppel vagy tartályos megoldás csökkenthetné a fogyasztást.

8.4 Integráció egy CAN-buszos robotikai rendszerbe

Egy valós robotikai alkalmazásban a megfogó nem önállóan működik, hanem egy nagyobb rendszer része, amelyet magasabb szintű vezérlés koordinál. A jelenlegi prototípusaink manuális, nyomógombos vezérléssel dolgoznak — ez a prototípus-fejlesztéshez megfelelő, de ipari integrációhoz kevés. A következő fejlesztési lépés tehát a CAN-buszos integráció, amely mindkét grippert ugyanabba a kommunikációs infrastruktúrába illeszti be.

A Controller Area Network (CAN) [21] robosztus, differenciális jelű, üzenet-alapú busz, amelyet autóiipari és ipari automatizálási környezetben széles körben használnak. Jellegzetessége, hogy új csomópontok hozzáadása a rendszerhez minimális: elég a buszra rácsatlakozni, egyedi ID-t választani, és máris kommunikálni lehet. A két gripperünk ehhez az architektúrához úgy illeszthető, hogy az Arduino Nano mellé egy MCP2515 SPI

CAN-kontroller és egy SN65HVD230 transceiver kerül; ezek együttese adja a CAN protokoll-logikát és a fizikai réteget.

A tervezett üzenetformátum alkalmazkodik a két gripper eltérő természetéhez. A soft gripper esetében az üzenet tartalmazná a kívánt szorítóerőt (0–255 skálán) és az irányt (nyitás/zárás/stop). A vákuumos gripper esetében egyszerűbb bináris parancsok kellenek (beszívás indítása, elengedés), esetleg egy nyomásszint-visszajelzés a státusz-üzenetben. A két gripper külön CAN ID-t kapna (pl. 0x210 a soft, 0x220 a vákuumos), így egyidejűleg is vezérelhetők.

Ez az integráció teszi lehetővé, hogy egy magasabb szintű döntéshozó (pl. egy Jetson fő számítógép egy humanoid robotban) a feladat jellege alapján automatikusan válassza ki a megfelelő megfogót: sík, merev tárgy → vákuumos ág, szabálytalan vagy törékeny tárgy → soft gripper.

8.5 Költségvetés

Az anyagköltségek (7. táblázat) alapján megállapítható, hogy mindkét rendszer a professzionális ipari megfogók árának töredékéből (kb. 5-10%-ából) megvalósítható. A vákuumos rendszer konkrét bontását az alábbi táblázat tartalmazza.

Megnevezés	Mennyiség	Egységár	Összesen
Vákuumos készlet (pumpák, szelepek, 4× 50 mm korong, csövek)	1 csomag	17 000 Ft	17 000 Ft
PETG-HF filament (vázszerkezet)	~520 g	8 000 Ft/kg	4 160 Ft
Arduino Nano mikrokontroller	1 db	2 000 Ft	2 000 Ft
MRS-101-C3 billenőkapcsoló (főkapcsoló)	1 db	270 Ft	270 Ft
Vandálbiztos nyomógombok	2 db	1 000 Ft	2 000 Ft
ÖSSZESEN			25 430 Ft

7. táblázat A vákuumos gripper anyagköltsége.

Ez a költségszint alkalmassá teszi a rendszert oktatási célokra vagy kkv-k számára prototípus szintű automatizáláshoz — pontosan az a réteg, ahol egy professzionális ipari gripper 300 000–500 000 Ft-os belépési ára már komoly akadály.

9. Összefoglaló

Dolgozatunkban két különböző koncepció alapján megépített robotikai megfogót, egy soft grippert és egy vákuumos grippert mutattunk be és hasonlítottunk össze. A mechanikus soft gripper rugalmas TPU ujjvégekkel és kétujjas kialakítással, lineáris motorral működik; a vákuumos gripper négy darab 50 mm-es szilikon tapadókoronggal, teleszkópos felfüggesztéssel és háromutas elektronikus szeleppel. Mindkét rendszert Arduino Nano mikrokontroller vezérli.

A soft gripper optimalizálása után 38,5 N szorítóerőt érünk el, és a tesztek során 100%-ban sikeresen emelt és tartott 1,5 kg-os tárgyakat rángatás mellett is. A henger alakú tárgyak kis átmérőnél nehezebben kezelhetők (60% sikerráta). A vákuumos rendszer elméleti maximális tartóereje 392,6 N, gyakorlati terhelhetősége 20 kg-ra lett méretezve; a tesztek során azonban a 3D nyomtatott vázszerkezet a vákuumerő hatására meghibásodott, ami rávilágított az FDM anyagok anizotróp viselkedésének fontosságára a tervezésnél.

A projekt eredménye kettős: egyrészt két működő prototípus, másrészt konkrét mérnöki tanulságok arról, hogyan kell egy ilyen rendszert méretezni és fejleszteni. A jövőbeli 2.0 verziók hibrid (műanyag + alumínium) vázszerkezettel, szenzoros visszacsatolással és robotkar-integrációval készülnek.

10. Summary

In this thesis we present two robotic grippers built on different operating principles — a soft gripper and a vacuum gripper — and compare their performance. The mechanical soft gripper uses flexible TPU fingertips in a two-finger configuration, driven by a linear motor. The vacuum gripper uses four 50 mm silicone suction cups, a telescopic spring suspension, and a three-way electronic valve. Both systems are controlled by an Arduino Nano microcontroller.

After optimization, the soft gripper achieves 38.5 N of gripping force and successfully lifted and held 1.5 kg objects under dynamic stress with a 100% success rate. Smaller cylindrical objects proved harder to handle (60% success rate). The theoretical maximum holding force of the vacuum system is 392.6 N, with a practical load capacity designed for 20 kg; however, during testing the 3D-printed frame structure failed under the vacuum-induced reaction forces, which highlighted the importance of considering the anisotropic behavior of FDM-printed materials in the design process.

The outcome of the project is twofold: on the one hand two functional prototypes, and on the other hand concrete engineering lessons about how such a system should be sized and developed. The planned 2.0 versions will feature hybrid frame structures (plastic + aluminum reinforcement), sensor feedback, and robot arm integration.

11. Irodalomjegyzék

- [1] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, „Soft Robotic Grippers”, *Advanced Materials*, vol. 30, no. 29, 2018, doi: 10.1002/adma.201707035.
- [2] C. Laschi, B. Mazzolai, and M. Cianchetti, „Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities”, *Science Robotics*, vol. 1, no. 1, 2016, doi: 10.1126/scirobotics.aah3690.
- [3] E. Brown et al., „Universal robotic gripper based on the jamming of granular material”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 44, pp. 18809–18814, 2010, doi: 10.1073/pnas.1003250107.
- [4] Schmalz GmbH, „Vacuum Technology Basic Principles”, *Technical Handbook*, 2020.
- [5] Festo AG, „Vacuum generators and suction cups — Technical Catalogue”, 2021.
- [6] Cytron Technologies, „MDDS motor driver User's Manual”, Rev 1.0, 2020.
- [7] Atmel Corporation, „ATmega328P — 8-bit AVR Microcontroller Datasheet”, Rev. 7810D, 2015.
- [8] J. M. Gere and B. J. Goodno, „Mechanics of Materials”, 8th ed., Cengage Learning, 2013.
- [9] S. Bhandari, A. Regina, and S. Lopez-Pamies, „On the fracture behavior of PLA and PETG 3D-printed specimens”, *Additive Manufacturing*, vol. 39, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101881.
- [10] J. Cantrell et al., „Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts”, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, 2017, doi: 10.1108/RPJ-03-2016-0042.
- [11] M. Ahmadilouydarab, S. Hosseinzadeh, and M. Masoomi, „Mechanical properties of PETG-based 3D-printed parts: effect of printing orientation”, *Polymers*, vol. 14, no. 4, 2022, doi: 10.3390/polym14040752.
- [12] G. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, and H. Schunk, „Robot Grippers”, Wiley-VCH, 2007.
- [13] B. Siciliano and O. Khatib (eds.), „Springer Handbook of Robotics”, 2nd ed.,

Springer, 2016.

[14] Arduino LLC, „Arduino Nano Reference”, <https://docs.arduino.cc/hardware/nano> (hozzáférés: 2026. április).

[15] M. Margolis, „Arduino Cookbook”, 3rd ed., O'Reilly Media, 2020.

[16] B. W. Schubert, R. M. van Poelgeest, and R. H. M. van de Molengraft, „Variable stiffness material and structural concepts for robot grippers: a review”, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 13, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1748-3190/aa965e.

[17] Shapr3D Zrt., „Shapr3D User Guide”, <https://shapr3d.com> (hozzáférés: 2026. április).

[18] I. J. Fernandes and T. M. Tessmann, „Silicone rubber in vacuum technology: material selection and behavior”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 1–6, 2020.

[19] ASTM International, „ASTM D638 — Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”, ASTM, 2014.

[20] Prusa Research, „Material Guide: PLA, PETG, and TPU in FDM 3D printing”, <https://www.prusa3d.com> (hozzáférés: 2026. április).

[21] International Organization for Standardization, „ISO 11898-1:2015 — Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 1: Data link layer and physical signalling”, ISO, Geneva, 2015.