

Szakdolgozat

Matastik Emma Imola



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Budai Campus
Élelmiszertudományi- és Technológiai Intézet
Élelmiszermérnök alapszak

**Cékla kivonat hatásának vizsgálata fehér kenyér glikémiás
tulajdonságára hibrid emésztésszimulációs módszerrel**

Konzulens: Tormási Judit

Tanszék: Élelmiszerkémia és Analitika Tanszék

Készítette: Matastik Emma Imola

Budapest
2024

Tartalom

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	5
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	7
2.1. A CÉKLA TÁPLÁLKOZÁS-ÉLETTANI JELLEMZŐI	7
2.2. BIOAKTÍV KOMPONENSEK	7
2.2.1. A cékla bioaktív komponenseinek kinyerési lehetőségei	9
2.2.2. Pulzáló elektromos tér alkalmazása.....	9
2.2.3. Enzimes extrakció alkalmazása.....	10
2.2.4. Mikrohullámú kezelés alkalmazása.....	10
2.3. CÉKLA KIVONATOK HATÁSA EMÉSZTÉSRE	11
2.4. SZÉNHIDRÁTOK.....	12
2.5. SZÉNHIDRÁTOK EMÉSZTÉSE	14
2.6. EMÉSZTÉS VIZSGÁLATÁNAK LEHETŐSÉGEI	14
2.6.1. INFOGEST modell	15
2.7. SZÉNHIDRÁTEMÉSZTÉS VIZSGÁLATÁNAK LEHETŐSÉGEI	16
2.7.1. Cékla bioaktív komponenseinek enzimgátló hatása	17
3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK.....	19
3.1. FELHASZNÁLT ANYAGOK	19
3.1.1. Kenyér minta elkészítése	19
3.1.2. Cékla kivonatok elkészítése	19
3.1.3. Emésztéshez felhasznált anyagok.....	20
3.2. MÉRÉSI MÓDSZEREK.....	21
3.3. GLÜKÓZ TARTALOM MEGHATÁROZÁS.....	23
3.4. GLIKÉMIÁS INDEX SZÁMÍTÁSA	24
3.5. BETALAIN-TARTALOM MÉRÉS	24
4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	25
4.1. BETALAIN TARTALOM.....	25
4.2. CÉKLA KIVONATOK HATÁSA A SZÉNHIDRÁTEMÉSZTÉSRE	26
4.2.1. Etanolos cékla kivonat	26
4.2.2. Desztillált vizes kivonat.....	28

4.2.3. Citromsavas kivonat.....	29
4.3. KIVONATOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	30
4.4. GLIKÉMIÁS INDEX SZÁMÍTÁS	32
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	34
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	37
7. IRODALOMJEGYZÉK.....	39
8. ÁBRAJEGYZÉK	49

1. Bevezetés és célkitűzés

A szénhidrátok az emberi szervezet számára elengedhetetlen tápanyagok, hiszen energiaforrásként szolgálnak, befolyásolják a vércukor- és inzulinszintet, illetve szerepet játszanak a vastagbél egészségének megőrzésében. Az emészthető szénhidrátok fontos tulajdonsága a glikémiás index, mely megmutatja, hogy milyen mértékben emelik a vércukorszintet. Ez a mérőszám azért fontos, mert segítségével meghatározható az egyes szénhidrátok emberi szervezetre gyakorolt hatása. A magas glikémiás indexszel rendelkező élelmiszerek túlzott fogyasztása különböző krónikus betegségek, például diabétesz kialakulásához vezethetnek. Mivel egyes tanulmányok alapján 2045-re a cukorbetegségben szenvedők száma 12%-ra nőhet, az iparban és az orvoslásban egyaránt igyekeznek módszereket találni a betegség kialakulásának megelőzésére (Kaur, Misra, & Swarnkar, 2023). Manapság igen nagy népszerűségnek örvendenek a különböző funkcionális élelmiszerek, melyek valamilyen pozitív hatást gyakorolnak a szervezetre, így a krónikus betegségek, mint a cukorbetegség, megelőzésében szerepet játszhatnak. Számos kutatás készült egyes zöldségek és gyümölcsök bioaktív komponenseinek, illetve azok tulajdonságainak vizsgálatára. Pozitív hatásukat több módon kifejezhetik, lehetnek antimikróbás és antioxidáns anyagok, de akár befolyásolhatják az emésztési folyamatokat is. Emellett a jelenlegi trendek szerint egyre több fogyasztó fordít nagyobb figyelmet az élelmiszerekben található adalékanyagok, így a mesterséges eredetű színezékek kerülésére. A zöldségekben és gyümölcsökben fellelhető bioaktív komponensek nagy része természetes színanyag, mint például karotinoidok és betalainok, melyeket az élelmiszeripar előszeretettel alkalmaz színekialakítási céllal. Ez több szempontból pozitív, hiszen ezen anyagok megítélése, természetes eredetükből adódóan sokkal jobb, mint a színezékeké, illetve bioaktív komponensek lévén egészségmegőrző hatásuk is lehet. Az élelmiszerek egyes anyagainak és azok hatásainak vizsgálatára számos módszer létezik, az utóbbi évtizedben elterjedtek az *in vitro* emésztésszimulációs modellek. Az egyik leggyakrabban használt statikus *in vitro* modell az INFOGEST protokoll, melyet 2014 óta alkalmaznak. A módszer kidolgozása során fontos szempont volt, hogy az emberi emésztőrendszerben lejátszódó folyamatokat minél jobban tükrözze (Minekus & et al., 2014). A módszert jelenleg többféle verzióban is alkalmazzák szénhidrátok emészthetőségének és az élelmiszerek glikémiás tulajdonságainak meghatározására (Tormási, Benes, Matkovits, & Abrankó, 2024).

A dolgozatom témája az, hogy megvizsgáljam a céklában lévő bioaktív komponensek, legfőképp színanyagok hatását a szénhidrátemésztésre. A folyamathoz három, az Élelmiszeripari Műveletek és Folyamattervezés Tanszék által előállított, etanollal, desztillált vízzel, illetve citromsavval kezelt cékla kivonat szénhidrát emésztésre gyakorolt hatását figyeltem meg. A cékla kivonatok előkészítése során eltérő oldószereket (etanol, desztillált víz és citromsav) alkalmaztak, ebből adódóan a kivonatok feltételezhetően eltérő mennyiségű és minőségű színanyagokat tartalmaznak, ezért először a különbségek feltérképezéséhez, meghatározom a betalain-tartalmukat. Az emésztésszimulációs kísérletekhez, az INFOGEST protokollon alapuló hibrid módszert alkalmaztam. A modell három részből, *in vivo* szájüregi, szemi-dinamikus gyomri és statikus vékonybél szakaszból épült fel. Az emésztésszimuláció során szénhidrát forrásként standard fehér kenyeret használok, amellyel önállóan is elvégzem a mérést, ami viszonyítási alapként szolgál. Ezután a különböző cékla kivonatokkal külön-külön végrehajtom az emésztést, majd spektrofotometriás méréssel vizsgálom a felszabadult glükóz mennyiségét. A felszabadult glükóz mennyiségéből következtethetünk arra, hogy a cékla kivonatokban fellelhető színanyagok befolyásolták-e a szénhidrátemésztést, és ha igen, ez hogyan hat a fehér kenyér glikémiás sajátságára.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A cékla táplálkozás-élettani jellemzői

A cékla (*Beta vulgaris*) a szegfűvirágúak (*Caryophyllales*) rendjébe és a disznóparéj félék (*Amaranthaceae*) családjába tartozik. Észak-Afrikából származik, innen terjedt el Európába, majd Ázsiába és Amerikába (Neelwarne & Halagur, 2013). Lágyszárú, jellemzően kétnyári, esetenként évelő növény, ami elérheti akár a 120 centiméteres magasságot. A növény gumóját különböző formában fogyasztják, mivel táplálkozás-élettani hatása jelentős, és számos az emberi szervezetre jótékony anyagot tartalmaz. Alacsony zsírtartalmú, valamint szénhidrátokban, főként keményítőben és oldható rostokban gazdag. Nagy a vitamin tartalma, az A, C, E, és K-vitamin, valamint a B-vitamin több típusa (B₁; B₂; B₃) nagy mennyiségben fordul elő benne (Babarykin , és mtsai., 2019). Ezen felül számos bioaktív komponens is megtalálható a céklában, melyek előfordulása és mennyisége függ attól, hogy a cékla növény melyik részét vizsgáljuk.

2.2. Bioaktív komponensek

A legtöbb növényi eredetű bioaktív komponens olyan másodlagos anyagcseretermék, ami farmakológiai vagy toxikus hatással rendelkezik. Mivel ezek az anyagok hatékonyak különböző megbetegedések megelőzésében, számos kutatás irányul arra, hogy hogyan lehet megőrizni az aktivitásukat, és így a jótékony hatásukat. Ezen felül, a felhasználási lehetőségeket is vizsgálják, hiszen ezek a komponensek színezékként, aroma- és íz anyagként már elterjedtek az élelmiszeriparban, de egyes élelmiszereknek bioaktív tulajdonságokat is kölcsönözhetnek (Antolak & Kregiel, 2017).

Az egyik ilyen komponens csoportot a fenolos vegyületek alkotják. Igen változatos a felépítésük, így az oldhatóságuk és a stabilitásuk sem egységes. A fenolos vegyületek főként növényi szövetekben találhatók meg, védik a szervezetet az UV sugárzástól, illetve a fertőzésektől (Adeboye, Bettiga, & Olsson, 2014). Az emberi szervezetre is jótékonyak, antioxidáns, gyulladáscsökkentő és trombózis megelőző hatásúak, természetesen ezeket a tulajdonságokat a molekulaszervezet is befolyásolja (Zin, Anucha , & Bánvölgyi , 2020).

Ezen felül, fontos azt is megfigyelni, hogy a növény melyik szervében vizsgáljuk a fenolos vegyületek mennyiségét és minőségét. A cékla héjában nagy mennyiségű rutin, illetve vanillin található (Maraie, Abdul-Jalil, Alhamdany, & Janabi, 2014). Emellett karotinoidok is megtalálhatóak, legnagyobb mennyiségben a β -karotin fordul elő (1,9 mg/100 mg). A karotinoidok szintén antioxidáns anyagok (Rebecca, Sharmila, Das, & Seshiah, 2014). A levelek nagyobb mennyiségű karotinoidot tartalmaznak, mint a gumók, ugyanakkor a gumókban találhatóak meg a céklára jellemző színyanyagok és bioaktív komponensek (Sawicki, Baczek, & Wiczowski, 2016).

A cékla jellegzetes színét a betalainok adják. Ebbe a vegyület csoportba tartoznak a betacianinok illetve a betaxantinok. A cékla átlagosan 30,9 – 445 mg/ 100 g betacianint és 16,2 – 242 mg/100 g betaxantint tartalmaz, ami igen magas koncentrációnak tekinthető (Righi Pessoa da Silva, 2018). A betacianinok ibolyaszínű, vízzoldható, nitrogéntartalmú indol és dihidropiridin származékok. A bioaktív hatás a szerkezetükből adódik, a gyűrűük hatodik szénatomján lévő hidroxil-csoporthoz kapcsolódó glikozil szubsztituens, illetve az amin-csoport lehetővé teszi a szabad gyökök megkötését. A cékla nagy mennyiségben tartalmaz betanint, ami a növényekben leggyakrabban előforduló betacianin pigment. Szerkezetileg a betanin és legtöbb származéka olyan aglikonból áll, ami β -glükózidos kötéssel kapcsolódik egy glükóz egység ötödik szénatomjához (Kumorkiewicz - Jarmo, Swiegrosz , Sutor , Sporna - Kucab, & Wybraniec, 2021). A betacianinok stabilitását több tényező, a pH, a fény, a vízáktivitás és az enzimatis reakciók is befolyásolják. Emellett érdemes megemlíteni azt is, hogy 30-70 °C között kevésbé termotabilak, mint a sárgás betaxantinok (Zin & Bánvölgyi S., 2021) (Nemzer, és mtsai., 2011; Slimen, Najar, & Abderrabba , 2017).

A betalainok másik csoportját a betaxantinok alkotják. Ezek a színyanyagok sárgás színűek, általában betalainsavhoz kapcsolódó aminok és aminosavak alkotják. A betaxantinokra is jellemző az antimikrobás és antioxidáns hatás. A cékla fogyasztása különböző termékek formájában történhet, így ezek gyártás-technológiája is befolyásolhatja a bioaktív anyagok mennyiségét, például a főtt cékla és céklalé fenolos vegyület tartalma magasabb, mint a porított, illetve szárított céklalé, ami feltehetőleg a szárítási folyamatból adódik (Mella , és mtsai., 2022). Nemcsak a szárítás okozhat változásokat, mert egyes bioaktív komponensek, mint például a betanin, igen érzékenyek a pH változásra és az enzimatis reakciókra is (Wiczowski, Romaszko, Szawara-Nowak , & Piskula, 2018).

2.2.1. A cékla bioaktív komponenseinek kinyerési lehetőségei

Az élelmiszerek meghatározó érzékszervi tulajdonsága a színük, viszont a legtöbb színanyag nem hőstabil, hőkezelés hatására bomlanak. Így az elvárt szint mesterségesen előállított színezékekkel biztosítja az ipar, viszont ezeknek az anyagoknak igen rossz a megítélése és egyes esetekben bizonyítottan káros hatásúak (Moghaddas kia, Ghaderzadeh, & Mojaddar Langroodi, 2020) (Monteiro Cordeiro De Azeredo, 2009). Ezért kezdenek egyre elterjedtebbé válni azok a színező anyagok, melyeket természetes forrásból nyernek ki.

Ezekre tökéletes példa a cékla jellegzetes színanyagai. Ugyan ezen anyagok felhasználása mellett több érv is szól, kinyerésük során számos paraméterre fokozott figyelmet kell fordítani annak érdekében, hogy változatlan formában rendelkezésre álljanak. A betanin kinyeréséhez számos termikus és nem termikus folyamatot alkalmaznak. A hagyományos módszerek termikus eljárásokon alapulnak. Ezeknél a folyamatoknál problémát okoz a kezelendő anyag alacsony hővezetési tényezője, ami gátolja a hőátvitelt és a hőkezelés hatására romolhat a termék minősége, hiszen a betanin nem hőstabil. Ezen felül a termikus módszerek nem túl gazdaságosak, mivel az energiafelhasználás igen magas ezeknél a folyamatoknál (Abraham Cardoso-Ugarte & Liceaga, 2014). Ennek okán egyre több ígéretesnek bizonyuló nem termikus extrakciós technológiát használnak, ilyen a mikrohullámmal vagy ultrahanggal végzett extrakció (Abraham Cardoso-Ugarte & Liceaga, 2014) (Righi Pessoa da Silva, da Silva, & Cervejeira Bolanho, 2015) (Zin & Bánvölgyi S., 2021), a pulzáló elektromos tér használata (Nowacka, Tappi, Wiktor, & Rybak, 2019), az enzimes extrakció (Lombardelli , Benucci, & Mazzocchi, 2021) vagy a szuperkritikus folyadék extrakció (Fabian Battistella Lasta, Lentz, & Mezzomo, 2019). Ezeknek a módszereknek az előnye, hogy jobb minőségű terméket eredményezhetnek, viszont a kihozatal alacsonyabb és a technológia kíméletességéből adódóan hosszabb ideig tartanak (Abraham Cardoso-Ugarte & Liceaga, 2014).

2.2.2. Pulzáló elektromos tér alkalmazása

A kíméletes extrakciós technológiák közé tartozik a pulzáló elektromos tér használata. A módszer elve, hogy az anyagot elektromos impulzusokkal kezelik, ami így pórusokat képez a sejtmembránon. A pórusokon keresztül a kivonandó anyagok kijutnak a sejten kívülre (Wang Sheng & Wang , 2017).

A folyamat előnye, hogy igen rövid ideig tart, hatékonyan kinyerhetők a bioaktív komponensek, illetve a végtermék minősége is magasabb (Toepfl, 2007). A módszer hatékonyságát több paraméter, az elektromos térerősség, az impulzusok frekvenciája és hossza befolyásolja (Visockis, Bobinaité, & Ruzgys, 2021). A pulzáló elektromos tér használata szolgálhat előkezelésként, illetve az élelmiszeriparban tartósító céllal is alkalmazzák (Wang Sheng & Wang, 2017). Több kutatás mutatja, hogy a pulzáló elektromos kezelés nem módosítja számottevően a bioaktív komponensek szerkezetét, illetve akár inaktiválhatja a zöltségek és gyümölcsök színváltozásáért felelős enzimeket, például a polifenol-oxidázt (Odriozola-Serrano, Soliva - Fortuny, & Martín - Belloso, 2008).

2.2.3. Enzimes extrakció alkalmazása

A bioaktív komponensek kiválasztására enzimes extrakciót is alkalmaznak. A folyamat során a sejtfalet enzimek, például celluláz, pektináz, α -amiláz és β -glükozidáz, segítségével bontják (Aliano-González & Carrera, 2021). Az extrakció eredményeként akár a különböző antocianin vegyületek is elválaszthatók. Ez azért különösen előnyös mert, a zöltség- és gyümölcsfeldolgozás alatt keletkezett hulladék, vagyis például a héj, további feldolgozással hasznosítható lehet, akár egészség megőrzési, akár technológiai cézzal (Kamiri & Kazemi, 2021).

2.2.4. Mikrohullámú kezelés alkalmazása

A mikrohullámmal végzett extrakció az utóbbi évtizedben egyre elterjedtebbé vált, hiszen számos előnye van a hagyományos technológiákkal szemben. Az élelmiszeriparban pektin kinyerésére kezdték el alkalmazni. A folyamat előnye, hogy nem roncsolódnak az oldalláncok, így nő a pektin felhasználási lehetőségeinek száma. Emellett a módszer segítségével számos élelmiszeripari és mezőgazdasági hulladék pektintartalmát ki lehet vonni (Yujie, Robinson, & Binner, 2023). A mikrohullámmal végzett extrakció nemcsak a pektin, hanem egyéb, bioaktív komponensek elválasztására is alkalmas. Számos kutatás irányul a zöld tea koffein, illetve a cékla betalain tartalmának kivonására (Saleem, Ullah, Kamreen, Hajri, & Alanazi, 2024). Annak ellenére, hogy a korszerű technológiák közé tartozik, a mikrohullámmal történő extrakciós módszer hátránya, hogy a keletkezett hő nem egyenletesen oszlik el, így elengedhetetlen, hogy a kezelt anyagot megfelelően forgassák (Hazervazifeh & M. Nikbakht, 2019), viszont a kivonandó anyag kihozatala sokkal magasabb, alacsonyabb

energiafelhasználás mellett, illetve kisebb mennyiségű oldószerre van szükség az extrakció során (Chen & Ding, 2008).

Továbbá előnyös, hogy ugyan a legtöbb kutatást hagyományos, háztartási mikrohullámú sütővel végezték el, a módszer meghatározó paraméterei (teljesítmény és kezelési idő) PLC-k használatával könnyen átültethetők az ipari gyakorlatba (Hazervazifeh & M. Nikbakht, 2019). A módszer során 300 MHz és 300 GHz közötti elektromágneses sugárzást használnak az anyag kezelésére, ami így hőt generál (Hazervazifeh & M. Nikbakht, 2019). A hő hatására a sejtek belsejében uralkodó nyomás jelentősen megnő, így a sejtfal felszakad (Hoang & Nguyen, 2017) (Pap, Beszédes, & Pongrácz, 2012). A roncsolt sejtfaon keresztül a különböző anyagok könnyen átjutnak a használt oldószerbe. A folyamat során fontos a kezelt anyag dielektromos tulajdonsága, hiszen a sugárzásból származó energia egy részét az anyag elnyeli, másik hányada pedig áthatol rajta. Ennek meghatározásához két paraméter szükséges, a dielektromos állandó (ϵ') és a dielektromos veszteségi faktor (ϵ''). A dielektromos állandó megmutatja, hogy a kezelt anyag milyen mértékben polarizálható az elektromágneses térben, míg a dielektromos veszteségi faktor arra vonatkozik, hogy az elektromágneses energia mely hányada alakul termikus energiává. A két paraméter aránya a disszipációs tényező, ami megadja, hogy a vizsgált anyag mennyire képes elnyelni a sugárzást, illetve hőenergiává alakítani azt (Lidström, Tierney, & Wathey, 2001).

2.3.Cékla kivonatok hatása emésztésre

A céklában található bioaktív vegyületeknek köszönhetően számos kutatást indítottak azzal a céllal, hogy milyen lehetőségek vannak a cékla, mint funkcionális élelmiszer felhasználására. Ezen kutatások legtöbbje arra irányul, hogy a cékla milyen hatással lehet a cukorbetegségekre. Ennek a trendnek az alapja egy patkányokon végzett állatkísérlet, mely igazolta, hogy a cékla extraktum hatékonyan csökkenti az éhgyomori vércukorszintet és fokozza az inzulintermelést (Al-Harbi, 2021). A II. típusú cukorbetegségben szenvedő betegekkel végzett klinikai vizsgálatok eredménye azonban nem ilyen egyöntetű, hiszen a beteg állapota és a genetika is befolyásolja az eredményeket (Daliri, és mtsai., 2023). A bioaktív vegyületek antidiabetikus hatásukat több módon kifejthetik. A leggyakrabban vizsgált folyamat az enzim gátlás. Például a cékla egyik színanyaga, a betanin inhibitorként is működhet, blokkolja α -amilázt és α -glükoszidázt. Ezen enzimek gátlásával az egész szénhidrát anyagcsere módosulhat, hiszen a nagyobb makromolekulák glükózra történő lebontása lelassul, ami megelőzheti a cukorbetegségeknél fellépő hiperglikémiás állapotot (Jiang, Young, Wang, Qian, & Cai, 2020).

Továbbá egyes kutatások szerint a fenolos vegyületek segíthetik a hasnyálmirigy β -sejtjeinek fennmaradását és működését. A β -sejtek legfőbb feladata a vérben található glükóz detektálása és megfelelő mennyiségű inzulin kiválasztása. Ezek a sejtek azonban rendkívül érzékenyek az oxidatív stresszre, könnyen károsodhatnak, melynek következményeként kialakulhat a cukorbetegség. Számos fenolos vegyület mutatott védő hatást a β -sejtekre az oxidatív stressz csökkentésével (Farias & Araújo, 2021). Ezen felül egyes komponensek a vastagbél mikrobiótájának megőrzésében is pozitív szerepet játszanak mind a cukorbetegségben szenvedő, mind az egészséges egyéneknél (Farias & Araújo, 2021). Ugyanakkor fontos megemlíteni azt, hogy a bioaktív vegyületek emésztésre gyakorolt hatását és hasznosulását befolyásolhatják az élelmiszer-mátrixban lévő egyéb vegyületek, legfőképpen a rostok, fehérjék és különböző cukrok (Farias & Araújo, 2021).

2.4. Szénhidrátok

Mivel a legtöbb céklával és a cékla bioaktív komponenseivel kapcsolatos táplálkozás-élettani kutatás a szénhidrátok emészthetőségére gyakorolt hatással foglalkozik, így dolgozatomban én is ennek vizsgálatát tűztem ki célul. A cékla és kivonatainak adagolásával elérhető lehetséges hatások megértéséhez először a szénhidrátokat és ezek emésztésének folyamatát mutatom be.

A szénhidrátok az egyik fő tápanyag csoportot képezik, így számos folyamatban van szerepük, illetve több módon csoportosíthatók. Elsősorban energiaforrásként funkcionálnak, befolyásolják a vércukorszintet és az inzulin mennyiségét. Emellett hozzájárulnak az emésztőcsatorna egészségének megtartásához is, hiszen vastagbélben történő fermentációs folyamatok szubsztrátumaként szolgálnak. A szénhidrátokat általában kémiai szerkezetük alapján csoportosítják, így lehetnek mono-, oligo- és poliszacharidok. A monoszacharidok, például a glükóz és a fruktóz, monomerként, vagyis építő egységként funkcionálnak az összetettebb szénhidrátokban. Ezek az édes ízű szénhidrátok leggyakrabban a gyümölcsökben, illetve a mézben fordulnak elő. Élelmiszerekben leggyakrabban ízkialakítás céljából, illetve tartósítási céllal alkalmazzák ezeket. Az oligo- és poliszacharidok olyan makromolekulák, melyek monoszacharidok kapcsolódásából keletkeznek, melyek közül oligoszacharidoknak általában a maximum nyolc monomer egységből álló makromolekulákat nevezzük (Cummings & Stephen, 2007).

Az élelmiszerekben leggyakrabban előforduló szénhidrát a keményítő, melynek felépítését és emészthetőségét több tényező, a növény rendszertani eredete, a termék feldolgozása és a

tárolási körülmények befolyásolják. A natív keményítő vízdoldhatatlan granulumok formájában fordul elő a gabonafélékben, gumós növényekben és a hüvelyesekben. A granulumok kétféle D-glükóz alapú polimerből épülnek fel. Az egyik rész az amilóz, ami nem tartalmaz elágazásokat, α -1,4 kötések tartják össze. A másik rész az erőteljesen elágazó amilopektin, ami α -1,4 és α -1,6 kötések egyaránt tartalmaz (Copeland & Blazek, 2009) (Cummings & Stephen, 2007). A különböző növényekből származó natív keményítők emésztése eltérő módon történik, a gabona keményítők jellemzően a vékonybélben teljesen megemésztődnek. Ezzel szemben a gumós növényekben és a hüvelyesekben előforduló keményítők ellenállóbbak, így ezekből visszamaradnak emésztetlen frakciók, melyeket a vastagbél mikrobiótája fermentál (Zhang, Ao, & Hamaker, 2006). Az emésztés során megfigyelhető változások több tényezőnek betudhatók, például az amilóz-amilopektin aránynak és a granulumok morfológiájának (Li, Hu, & Gong, 2021). A szénhidrátok csoportosítása táplálkozás-élettani hatásuk, emészthetőségük alapján is lehetséges. Eszerint megkülönböztetünk emészthető és nem emészthető szénhidrátokat (Englyst, Liu, & Englyst, 2007). A nem emészthető szénhidrátok, főként összetett keményítők és rostok, nem kerülnek lebontásra az emberi tápcsatornában, csupán a vastagbélben lévő mikroorganizmusok képesek fermentálni ezeket, így különböző jótékony anyagokat hozva létre, például rövid szénláncú zsírsavakat (Byrne, Chambers, Morrison, & Frost, 2015). Az emészthető szénhidrátokat ellenben képes az emésztőrendszerünk monomer egységeire, azaz glükóz molekulákra bontani. A glükóz molekulák pedig képesek átjutni a bélfalon ezáltal energiát szolgáltatva a szervezetnek. Ebből adódóan az emészthető szénhidrátok közös tulajdonsága, hogy vércukorszint emelő hatással rendelkeznek. Ezeket az anyagokat ezáltal jellemezhetjük a glikémiás indexszel (GI). Az emészthető szénhidrátokat glikémiás indexük alapján szintén csoportosíthatjuk. A monoszacharidok és oligoszacharidok emésztése után gyorsan emelik a vércukorszintet, ezzel szemben a poliszacharidok többségének hatása kisebb. Fontos megjegyezni, hogy az alacsony glikémiás indexszel rendelkező szénhidrátok fogyasztásával csökkenthető különböző krónikus betegségek, például 2-es típusú diabétesz kialakulásának kockázata (Wong & Jenkins, 2007).

2.5. Szénhidrátok emésztése

Az emberi emésztőrendszerben bonyolult, többlépcsős fiziko-kémiai-biológiai folyamatok játszódnak le, melyeket többek között hormonok irányítanak. A csatorna körülbelül kilenc méter hosszú, a szájüregtől a végbélnyílásig tart, a fő részei, a garat, a nyelőcső, a gyomor, a vékony-, és vastagbél. Ezek mellett járulékos szerveket is megtalálhatunk, melyek segítik az emésztési folyamatokat, ilyenek a nyálmirigyek, a máj, az epehólyag és a hasnyálmirigy (Saladin, 2017). A szénhidrátemésztésben két enzim játszik fő szerepet, a nyálamiláz, illetve a hasnyálamiláz, melyek az emésztőrendszer különböző pontjain fejtik ki a hatásukat. A szénhidrátok emésztése a szájüregben kezdődik, ahol az emésztést a nyálamiláz kezdi meg. Ez az enzim, a keményítő, a maltodextrinek és a maltooligoszacharidok α -1,4 kötéseit bontja. Azonban aktivitását igen rövid ideig tartja meg, hiszen a gyomorban uralkodó alacsony pH-nak köszönhetően inaktiválódik (Bornhorst & Singh, 2012). A szénhidrátemésztés a vékonybél szakaszban folytatódik, hiszen ekkor a hasnyálamiláz a nyálamiláz által bontott szénhidrátokat maltózzá, maltotriózzá és egyéb kisebb oligoszacharidokká hidrolizálja. A hasnyálamiláz által történő bontás a szénhidrátemésztés legjelentősebb szakasza, hiszen a vékonybél szakaszban a fehérjék már hidrolizált állapotban vannak, így az általuk közre fogott szénhidrátok elérhetővé válnak az enzim számára (Freitas & Le Feunteun, 2019). A hasnyálamiláz aktivitását igen széles, 5-10-es pH tartományban megőrzi, viszont 7-es pH érték, illetve kalcium és magnézium jelenléte szükséges optimális működéséhez. A szénhidrátok lebontását, és felszívódását számos tényező befolyásolja, mint az élelmiszer állapota, viszkozitása, és természetesen a jelenlévő szénhidrátok kémiai szerkezete (Jenkins, Kacinik, Lyon, & Wolever, 2010). Emellett az emésztőrendszer egyes részei különböző, bonyolult folyamatokban játszanak szerepet, melyek nagyban befolyásolják az élelmiszerek táplálkozás-élettani hatását, így az elmúlt években az emészthetőségi vizsgálatok fontossága felértékelődött. Az emberi emésztő traktus és működésének vizsgálatára több lehetőség van.

2.6. Emésztés vizsgálatának lehetőségei

Az élelmiszerek felépítése és struktúrája fontos szerepet játszik abban, hogy az emésztés milyen hatást gyakorol a táplálkozástan tulajdonságaira (Bornhorst & Singh, 2012). Az élelmiszermátrix befolyásolja a tápanyagok felszabadulását, illetve azt, hogy ezek az anyagok milyen állapotban jutnak el a különböző szervekhez. Emiatt fontosak az emésztési vizsgálatok, hiszen ezekkel modellezhetők az emésztőrendszerben lejátszódó folyamatok.

A szénhidrátemészthetőség és a glikémiás index megfigyelésére emésztésszimulációs módszereket alkalmazhatunk. Ezek lehetnek *in vivo* és *in vitro* módszerek, az alapján, hogy a vizsgálatot állatokon, esetleg embereken végezték el vagy alternatív modellekkel. Természetesen ideális esetben az *in vivo* kísérletek adják a legpontosabb megközelítést, hiszen ezeket embereken és állatokon végzik, viszont nagyon sok időt igényelnek és nem utolsósorban nagyon költségesek. Ezen korlátoknak az áthidalására születtek meg az *in vitro* emésztésszimulációs modellek (Directive 2001/20/EU) (Boisen & Eggum, 1991). Ezen vizsgálatok már az 1990-es évek óta használhatók a különböző élelmiszerek emésztésének modellezésére (Ferrua & Singh, 2010). Az utóbbi években folytatott fejlesztéseknek és kutatásoknak köszönhetően az *in vitro* módszerek hasznos alternatívaként szolgálnak az *in vivo* modellekkel szemben, hiszen reprodukálhatóak, illetve kevésbé költségesek. Az *in vitro* modellek lehetnek statikusak és dinamikusak. A dinamikus modellek komplexebbek, így jobban tükrözik az *in vivo* állapotot. Míg a statikus modellek nem mutatják be az emésztőrendszerben keletkező anyagok képződésének folyamatosságát, majd felszívódását. Ahhoz, hogy a szimulációk alapján valós következtetéseket lehessen levonni, biztosítani kell az emberi szervezethez hasonló körülményeket, a szervekhez tartozó tranzit időt, a pH-t, a megfelelő hőmérsékletet, továbbá dinamikus modellek esetén, a perisztaltikus és egyéb mozgásokat is (Liu, Ye, Han, & Han, 2019). Annak ellenére, hogy a statikus *in vitro* módszerek kevésbé tükrözik az *in vivo* állapotot, elterjedten alkalmazzák a különböző tápanyagok emészthetőségének megfigyelésére. Ezen módszerek közül leggyakrabban az INFOGEST modellt használják, mely egy egységesen elfogadott módja az emberi emésztés modellezésének (Brodkorb, Egger, Alminger, & et al., 2019) (Atkinson, Brand-Miller, Foster-Powll, Buyken, & Goletzke, 2021).

2.6.1. INFOGEST modell

Az INFOGEST modellt 2014 óta alkalmazzák statikus, *in vitro* emésztésszimulációra (Minekus & et al., 2014). A folyamat három egységre bontható, a minta előkészítésre, az emésztési szakaszra és a kezelt minta analízisére (Brodkorb et al., 2019). Az előkészítési szakaszban először megállapítják a használni kívánt enzimek és az epe mennyiségét, ami kritikus a kísérlet tekintetében, mert meghatározza a kimenetelét (Egger, 2016). Ezután indítható el az emésztésszimuláció, kezdve a szájüreggel, ahol a vizsgált élelmiszert 1:1 arányban hígítják mesterséges nyállal, amely általában nyálamilázt tartalmaz. Ez a lépés nem hagyható el, hiszen segíti az élelmiszer puhítását, így előkészítve a következő lépésekre. A hígított bolus a gyomor

szakaszba kerül, ahol két órán keresztül pH=3 értéken kezelik a gyomorra jellemző enzimekkel, vagyis pepszinnel és gyomri lipázzal. Ezután a kezelt minta a szimulált bélhez jut, ahol 1:1 arányban keveredik az epével és a hasnyálmirigy által kiválasztott enzimekkel, mely további két órát igényel. Az emésztés utolsó lépése a mintavétel, majd ezt követi a kezelt minta analízisa (Minekus & et al., 2014). Az INFOGEST módszer előnye, hogy reprodukálható, az egyes szakaszok jól elkülöníthetők egymástól, illetve a folyamat költségei is alacsonyabbak. A protokoll célja, hogy az *in vitro* kísérleti körülményeket úgy alakítsa ki, hogy azok minél jobban modellezzék az *in vivo*, vagyis az emberi szervezetben lejátszódó folyamatokat. Ugyanakkor az INFOGEST módszer több szempontból hátrányos. Mivel statikus emésztésszimulációs modell, a gyomorban a pH állandó, mely előnytelen a szénhidrátemésztés megfigyelésének szempontjából. Emellett a protokoll a bél szakaszt nem különíti el több részre és az emésztés végén, a vastagbélben lejátszódó mikrobiális folyamatokat sem modellezi (Egger & et al., 2017).

2.7. Szénhidrátemésztés vizsgálatának lehetőségei

A szénhidrátemésztés *in vivo* megfigyelésének egyik lehetősége a glikémiás index (GI) meghatározása. Ez a mérőszám megmutatja, az elfogyasztott élelmiszerben található szénhidrát milyen mértékben hidrolizálódott, illetve szívódott fel, így milyen mértékben emeli meg a vércukorszintet (Jenkins, 2002). Ennek meghatározására szabványos módszer is létezik (ISO 26642:2010).

A keményítő emésztés folyamatát számos *in vitro* emésztési modellel vizsgálják, mely által a keményítő bontás alatt keletkezett termékek megfigyelhetők. A hagyományos INFOGEST módszernél leggyakrabban a vékonybél szakaszban lejátszódó amilolízist veszik figyelembe, hiszen a statikus modellben – ahol a gyomri szakaszban pH=3-on játszódnak le a folyamatok – a nyálamiláz hatása kisebb a keményítő bontás során. Ehhez az emésztmény minta analízise előtt centrifugálással választják el a meg nem emésztett keményítőt. A redukáló cukor mennyiségének meghatározására pedig kolorimetriás méréseket alkalmaznak (Brodkorb, Egger, Alminger, & et al., 2019).

Ennek okán az *in vitro* emésztési vizsgálatok során a nyálamiláz hatása elenyészőnek tűnhet a hasnyálmilázéval szemben (Woolnough & et al., 2010). Ugyanakkor ezek a vizsgálatok nem teljesen tükrözik az *in vivo* körülményeket, hiszen az elfogyasztott étel a gyomorban 75-107 perc alatt éri el a pH 2-es körüli értéket, így a nyálamiláz nem veszi el azonnal az aktivitását, ezáltal bontja a rendszerben lévő szénhidrátokat.

Egyes *in vitro* kutatások szerint a nyálamiláz a gyomor szakaszban eltöltött 30 perc alatt a használt kenyérminta keményítő tartalmának 80%-át hidrolizálja (Freitas & Le Feunteun, 2017). Daniela Freitas és Steven Le Feunteun három élelmiszermintán vizsgálta a nyálamiláz hatását a teljes emésztést tekintve. Az így kapott eredmények alapján az élelmiszerek glikémiás indexe is meghatározható, azonban ennek pontos megfigyeléséhez a szénhidrátemésztés minél pontosabb megfigyelése szükséges. Vagyis a szénhidrátok emésztésének *in vitro* megfigyelése során több fontos paraméter figyelembevételére is szükség van. Ilyen paraméter az emberi eredetű nyálamiláz használata, a gyomri pH dinamikájának minél pontosabb modellezése, illetve a folyamatos mintavételezés bevezetése (Tormási, Benes, Matkovits, & Abrankó, 2024). Erre jelenleg több lehetőség is nyílik, melyek közül kiemelendő a szemi-dinamikus INFOGEST modell (Mulet-Cabero et al., 2018) és a hibrid INFOGEST modell (Tormási, Benes, Matkovits, & Abrankó, 2024).

2.7.1. Cékla bioaktív komponenseinek enzimgátló hatása

A cukorbetegség előfordulása rohamosan nő a fejlett országokban. Egyes kutatások szerint ezen régiókban 2045-re a lakosság 12% érintett lesz a betegség által (Kaur, Misra, & Swarnkar, 2023). Jelenleg a II. típusú diabétesz kezelése során az a cél, hogy a vérplazmában megtalálható glükóz szintjét kontrollálják (Tarigopula, Chatterjee, & Davies, 2017). Erre általában amilolitikus enzimgátlókat, akarbózt és metformint alkalmaznak. Ezek a készítmények gátolják a szénhidrátemésztésért felelős α -amiláz és α -glükozidáz enzimeket. Az α -amilázt a hasnyálmirigy választja ki, ezzel megindítva a keményítő és egyéb poliszacharidok hidrolízisét. Ezután a további glükóz felszabadítás az α -glükozidáz enzim által történik (Usman, Sharma, & Satija, 2019). Az utóbbi években számos kutatást végeztek annak feltárására, hogy az egyes élelmiszerekben milyen természetes eredetű α -glükozidáz inhibitorok találhatók meg (Giubreti & Rocchetti, 2020). Leggyakrabban a fenolos vegyületek gátló hatását vizsgálják, mely abban rejlik, hogy ezek a vegyületek képesek fehérjékhez kötődni. Ez alól természetesen az enzimek sem képeznek kivételt, a fenolos vegyületek akár az enzimek aktív helyéhez is kapcsolódhatnak (Shahidi & Dissanayaka, 2023).

Egy Olaszországban elvégzett kutatás során azt vizsgálták, hogy a különböző zöldségekben (kapribogyó, paradicsom, padlizsán, olíwabogyó és retek) előforduló polifenolok milyen hatással vannak a tésztában található keményítő emésztésére. A folyamatot az INFOGEST protokoll szerint végezték el, vékonybél szakaszt α -glükozidáz enzim hozzáadásával vizsgálták. Az emésztést elvégezték a különböző zöldségekkel egyenként, illetve

zöldségkeverékekkel is. Az emésztés végén meghatározták a felszabadult glükóz mennyiségét, illetve spektrofotométer segítségével, a fenolos vegyületek mennyiségét. Az emésztésszimulációs vizsgálat eredményei alapján megállapították, hogy a gátló hatás nem a fenolos vegyületek mennyiségéből, hanem minőségéből adódik, hiszen egyes zöldségek nagyobb gátló hatást okoztak. Ennek okán további vizsgálatokkal meghatároztak néhány vegyületet, melyek csökkenthetik az amilolitikus enzimek aktivitását. A legnagyobb, akár 41%-os gátló hatással rendelkező vegyület a klorogénsav. A kutatás eredményeként elmondható, hogy a fenolos vegyületekben gazdag zöldségek és keményítőben gazdag élelmiszerek együttes fogyasztása gátló hatás által csökkentheti a vércukorszintet az α -glükoszidáz gátlásával (Catteveli, Zannini, & Conte, 2024). Emellett a fenolok vagy fenolos vegyületek nemcsak az α -glükoszidázt, hanem a másik szénhidrát bontó enzimet, az α -amilázt is gátolhatják. Több tanulmányban vizsgálták a luteolint, ami az egyik legnagyobb amiláz gátló hatással rendelkező polifenol. Annak ellenére, hogy számos kutatás sikeresnek bizonyult, több nehézséggel szembesültek a kutatók. Az egyik legnagyobb problémát az emésztésszimulációs módszer során használt sertés hasnyál α -amiláz okozta. Ez az állati enzim nem egyezik meg teljesen sem az emberi hasnyálból, sem a nyálból származó α -amilázzal. Az enzimek között csupán 87.1% és 86%-os egyezés mutatható, ami már elég eltérés ahhoz, hogy a gátlásuk különböző módon történjen. Az egyes különbségek meghatározására végeztek kísérleteket mind sertés, mind emberi amiláz enzimmal. A kutatások eredményeként elmondható, hogy a humán eredetű hasnyál α -amilázt az anticianidok sokkal nagyobb mértékben gátolják, mint a sertés hasnyál által kiválasztott enzimet (Visvanathan & Houghton, 2024).

3. Anyagok és módszerek

3.1. Felhasznált anyagok

3.1.1. Kenyér minta elkészítése

Az emésztésszimuláció során standard kenyérmintát alkalmaztunk. Ehhez 500 g BL50-es lisztet, 7 g instant élesztőt, 340 ml vizet, 4 g cukrot és 7 g sót összekevertünk. Ezután a tésztát *Bosch MUM4830* dagasztógéppel dagasztottuk, majd 50 °C-on 30 percen keresztül kelesztettük. A kenyeret Memmert szárítószekrényben 180 °C-on 50 percen keresztül sütöttük. A késztermék nedvességtartalma 42,51%, melyet 105 °C-on tömegállandóságig szárítással mértünk. Az emészthető keményítő tartalmat előzetesen, *Megazyme (K-DSTRS)* enzimes kit segítségével határoztuk meg, ami alapján a kenyérminta összes emészthető keményítő tartalma, vagyis a TDS (Total Digestible Starch) 49 g/100 g nedvestömegre megadva.

3.1.2. Cékla kivonatok elkészítése

Az emésztési vizsgálathoz használt céklaleveket az Élelmiszeripari Műveletek és Folyamattervezés Tanszék állította elő és biztosította a méréseinkhez. A céklát először megtisztították az esetleges szennyeződésektől, majd a gumókat óvatosan meghámozták. Ezután *Retsch GM2000 Grindomix* aprítógép segítségével, 2 percen keresztül 2000 rpm fordulatszámon aprították a céklák héját. A kivonatok készítéséhez mikrohullám segítségével történő extrakciót alkalmaztak, három különböző oldószer (desztillált víz, 50 V/V% etanol és 0,5 m/m%-os citromsav oldat) mellett, melyekből a felhasznált mennyiség 0,1 g/ml a héjhoz mérten. A kezelést 800 W teljesítményen végezték, 2 percen keresztül, szakaszos üzemmódban, annak érdekében, hogy a kezelt minta ne melegedjen túl. Ezt úgy valósították meg, hogy 20 s kezelést, 40 s hűtés követett. A kezelés poharakban történt, amelyeket lefedtek, így megakadályozva a használt oldószerek párolgását. Az extrakció végeztével a mintákat jeges fürdőben lehűtötték, majd leszűrték és -18 °C-on tárolták felhasználásig (Moh Moh , Nagy, Bánvölgyi, Abrankó , & Arijit, 2022) (Moh Moh & Bánvölgyi , 2023). Az etanolos kivonatot az emésztésszimulációs kísérletek elvégzése előtt további előkészítésnek vettették alá, annak érdekében, hogy a kivonat nagy etanol tartalma ne befolyásolja az enzimek aktivitását. A kivonatot 15 ml-es egységekben 50 ml-es centrifuga csövekbe töltöttük, majd vákuumcentrifuga segítségével bepároltuk a mintákat fele térfogat eléréséig (kb. 5-7 ml-re). Ezután a kivonatokat desztillált vízzel 15 ml-re egészítettük ki a koncentráció megtartása érdekében, és a kivonatokat így használtuk fel az emésztési kísérletekben.

3.1.3. Emésztéshez felhasznált anyagok

Az emésztésszimuláció elvégzéséhez a 1. táblázatban található összetevőkből elkészített szimuláns oldatokat használtam.

1.TÁBLÁZAT: EMÉSZTŐENZIMEK ÖSSZETEVŐI

(FORRÁS: SAJÁT SZERKESZTÉS)

Összetevők	Szervetlen gyomor szimuláns	Szervetlen vékonybél-nedv szimuláns
pH	7	7
Végső koncentráció az oldatban (mM)		
KCl	6.9	6.8
KH ₂ PO ₄	0.9	0.8
NaHCO ₃	25	85
NaCl	47.2	38.4
MgCl ₂ (H ₂ O) ₆	0.12	0.33
NH ₄ (CO ₃) ₂	0.5	-
CaCl ₂ (H ₂ O)	0.15	0.6
HCl	15.6	8.4
NaOH	-	-

Az emésztéshez emellett két emésztőenzimet és epe kivonatot kell előkészíteni. A pepszin oldat (2000 U/ml) előállításához 46,5 mg liofilizált sertés pepszin kivonatot (*Sigma-Aldrich*, 3200 U/mg) oldottam fel 3,8 ml szervetlen gyomori szimuláns (SGF) oldatban. A pankreatin enzimkivonat (800 U/ml tripszin ekvivalens) elkészítéséhez 265,1 mg sertés vékonybélből kivont pankreatint (*Sigma-Aldrich*, 8xUSP) 5,5 ml vékonybél szimulánssal (SIF) kevertem, vortex segítségével homogenizáltam (10 s), 5 percre ultrahangos fürdőbe helyeztem, majd 5 percen keresztül, 5000 rpm, 4°C-on centrifugáltam. A centrifugálás során keletkezett felülúszót leöntöttem, és ezt használtam fel az emésztés során. Az epe kivonat elkészítéséhez (160 mM) 4,2 mg sertés epe port (*Sigma-Aldrich*) 2,6 ml SIF-ben oldottam fel. A kész emésztőenzimeket felhasználásig hűtőbe helyeztem, így megőrizve aktivitásukat.

3.1.4. Egyéb anyagok

A mérések során továbbá felhasználtam még az emésztésszimulációhoz szükséges specifikus eszközöket (1. ábra) illetve az itt felsorolt vegyszereket.

- Sigma 96% tisztaságú CaCl_2
- 3 M HCl oldat
- 1 M NaOH oldat
- 97,6 – 98% - os teljesen denaturált, vízmentes etanol
- amiloglikozidáz enzim: Megazyme, 200 U/mL β -maltozid
- glükóz oxidáz peroxidáz enzim
- standard glükóz oldat: Megazyme 1 mg/mL 0,2 % benzooesavban
- desztillált víz

1. ÁBRA: FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK
(FORRÁS: SAJÁT KÉP)



3.2. Mérési módszerek

3.2.1. Emésztésszimuláció

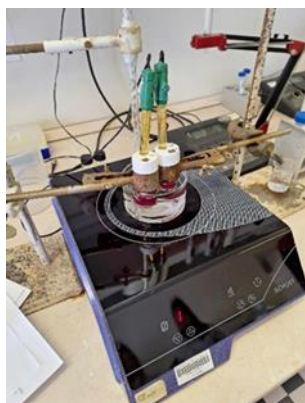
A mérések végrehajtását egy INFOGEST protokoll alapú hibrid emésztésszimulációs módszer alapján végeztem (Tormási et al., 2024). Ez a módszer három szakaszból áll; *in vivo* száji szakasz, *in vitro* szemi-dinamikus gyomri szakasz és *in vitro* statikus vékonybél szakasz.

A vizsgálathoz használt edény táratömegét feljegyezzük, majd megkezdjük az emésztésszimulációt az *in vivo* szájüregi szakasszal. Összerágjuk az 1,65 g standard kenyér mintát, majd az előzetesen lemerített edénybe juttatjuk. A köpethez 3,35 g kezelt céklalevet és meghatározott mennyiségű desztillált vizet adunk ($\Sigma V=10$ ml), majd a teljes edény tömegét lemérjük, feljegyezzük és elindítjuk az *in vitro* folyamatot. A mintát tartalmazó edényeket 37°C-os vízfürdőbe helyezzük, a minták folyamatos keverését mágneses keverő segítségével biztosítjuk. Az előzetesen kalibrált pH mérőket a kenyérmintát tartalmazó edénybe tesszük, így figyelemmel kísérhetjük pH értékét az egész emésztés alatt. A szájüregi szakaszt a gyomori szakasz követi, melyet 6,4 ml gyomor szimuláns oldat hozzáadásával kezdünk. Ezt követően 5 μ l CaCl_2 -oldatot, 1,6 ml pepszint és 1,5 ml desztillált vizet adunk az emésztményhez. A gyomori szakasz során a cél, hogy 90 perc alatt pH 2-es körüli értéket érjük el, ennek okán a mintához folyamatos keverés mellett, 5 percenként, pH értéktől függően 10-20 μ l 3 M HCl oldatot adunk. A HCl fokozatos hozzáadása fontos a folyamat szempontjából, hiszen így a nyálamiláz nem inaktiválódik azonnal, hatását elnyújtottan fejti ki a gyomori szakaszban, ami így *szemi-dinamikusnak* tekinthető. A mérés során először 15, majd 30 percenként a mintát tartalmazó edényből mikrocsovekbe 2 ml mintarészletet veszünk ki, ezeknek feljegyezzük a táratömegét, majd lemérjük mintával együtt is, majd hűtőbe helyezzük, hogy a jelenlévő enzimek aktivitása csökkenjen.

A vékonybél szakasz a 120. perc után kezdődik. Ebben a szakaszban 4,26 ml vékonybél szimuláns oldatot, 20 μ l CaCl_2 -oldatot, 1,25 ml epe kivonatot és 2,5 ml pankreatint adunk az emésztményhez. Ezután NaOH hozzáadásával beállítjuk a pH-t 7-es körüli értékre, majd a rendszerbe desztillált vizet juttatunk úgy, hogy a lúg és a víz térfogata együttesen 1,98 ml legyen.

Az emésztési folyamat alatt először 5 percenként, majd a vékonybél szakasztól 30 percenként feljegyezzük a pH értékeket. A mérési elrendezés az 2. ábrán látható.

2. ÁBRA: EMÉSZTÉSSZIMULÁCIÓ ELRENDEZÉSE (Forrás: Saját kép)



3.3. Glükóz tartalom meghatározás

A glükóz tartalom meghatározásához az emésztés során vett mintarészletek további kezelést igényelnek. A levett emésztmény részleteket centrifugálással 4°C-on 10 percen át, 13000 rpm-en üleptítjük. Ezután a felülúszóból 400 µl-t pipetázunk 1600 µl etanolra, így elválasztjuk az emészthetőnek tekinthető frakciókat. Vortexelés után a mintákat ismét centrifugáljuk (4°C, 10 perc, 13000 rpm). A mintákat ezután hígítjuk, azaz 50 µl felülúszót pipetázunk 950 µl desztillált vízhez. Az így keletkezett mintarészletek glükóz tartalmát további kezeléseket után határozzuk meg. Első lépésként a hígított minta 25 µl-hez 25 µl amiloglikozidáz enzimet adunk, majd a mintasort 30 percre 50°C-os vízfürdőbe helyezzük. Ezután a hidrolizált mintákhoz 750µl glükóz-oxidáz-peroxidáz enzimet adunk, majd további 20 percre visszahelyezzük az 50°C-os vízfürdőbe. A kezelést 1 mg/ml-es standard glükóz oldattal is elvégezzük, ez teszi lehetővé, hogy a mérési eredmények mennyiségi elemzését elvégezhessük. A kezelt mintákat és a standard-oldatot *Thermo Electron Corporation Evolution 300 BB* spektrofotométerrel vizsgáljuk. A mérőberendezésen beállítjuk a méréshez használt 510 nm hullámhosszúságot, majd küvetta nélkül 0 értékre állítjuk a spektrofotométert. Ezután a méréshez használt küvetta megtöltjük a mintával, behelyezzük a berendezésbe, majd vizsgáljuk és feljegyezzük az abszorbancia értékeket. A kapott eredményekből kiszámoljuk az egyes időpillanatokban felszabadult glükóz mennyiségét (g glükóz/ 100 g kenyér), mely alapján a szénhidrát felszabadulás kinetikája ábrázolható, valamint a minta glikémiás indexe (GI) is meghatározható.

3.4. Glikémiás index számítása

A glikémiás index meghatározásához az ISO 26642-es szabványt módszerét vettem alapul, a Tormási et al., által kidolgozott módosításokat követve (Tormási, Benes, Matkovits, & Abrankó, 2024). A számításhoz az emésztésszimuláció eredményeként vizsgált glükóz koncentrációt használtam úgy, hogy 120. percre számoltam a görbe alatti terület (AUC) értékeket, majd a referenciaként alkalmazott fehér kenyérnél felvett görbe alatti terület értékekhez hasonlítottam. A viszonyításhoz a kenyér feltételezett 71-es GI értékét használtam. A glikémiás indexet a 1. képlet alapján számítottam.

$$I_{G,t} = \frac{A_t}{\bar{A}_{ref}} * 100$$

1. KÉPLET: GLIKÉMIÁS INDEX SZÁMOLÁSHOZ HASZNÁLT KÉPLET, AHOL $I_{G,t}$ - vizsgált élelmiszer glikémiás indexe, A_t – görbe alatti terület a vizsgált élelmiszer esetén, $\bar{A}_{ref}$ - görbe alatti terület a referencia élelmiszer esetén.

3.5. Betalain-tartalom mérés

A kezelt céklalevek betaxantin és betacianin tartalmát spektrofotometriás mérés alapján határoztam meg. Az abszorbancia értékeket betaxantin esetén 480 nm, míg betacianin vizsgálat során 535 nm hullámhosszon vizsgáltam (M.M., Márki, & Bánvölgyi, 2020). A céklakivonatokat először hígítottam, azaz 100 µl céklakivonathoz 9900 µl desztillált vizet adtam, ami 100-szoros hígítást jelent. Így keletkezett oldatokat *Thermo Electron Corporation Evolution 300 BB* spektrofotométerrel, a színyanyagoknak megfelelő hullámhosszon vizsgáltam, majd a betalain tartalmat az 2. képlet alapján határoztam meg (M.M., Márki, & Bánvölgyi, 2020).

$$BC = \frac{A * MW * DF * 1000}{\epsilon * L}$$

2. KÉPLET: BETALAIN TARTALOM SZÁMOLÁSÁHOZ HASZNÁLT KÉPLET, AHOL A – ABSZORBANCIA, MW - MOLEKULATÖMEG (BETAXANTIN: 308 G MOL⁻¹, BETACIANIN: 550 G MOL⁻¹), DF – HÍGÍTÁSI FAKTOR (100-SZOROS), ϵ – KOEFFICIENS (BETAXANTIN: 48 000 L MOL⁻¹, BETACIANIN: 60 000 L MOL⁻¹), L – hullámhossz (betaxantin: 480 nm, betacianin: 535 nm).

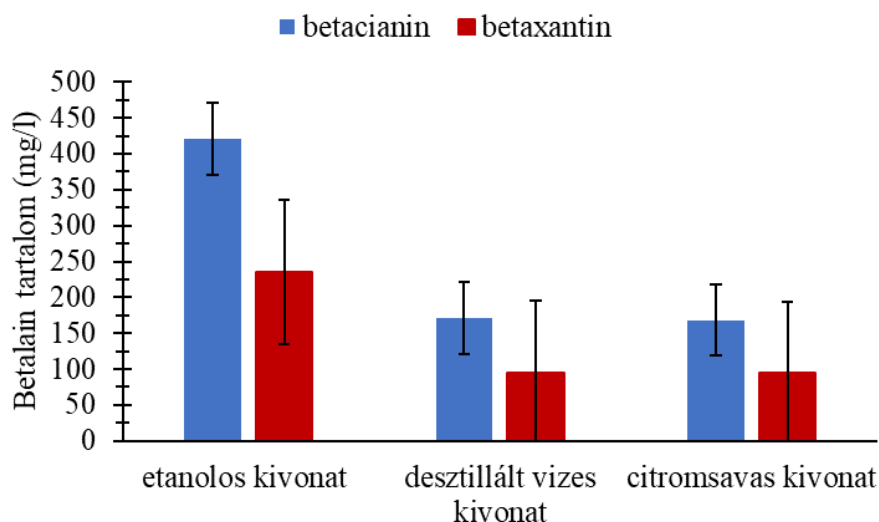
4. Eredmények és értékelésük

Az utóbbi évtizedekben számos kutatást indítottak olyan élelmiszerek és alapanyagok felhasználásával, melyek pozitív hatással bírnak az emberi szervezetre. Dolgozatomban, egy ritkábban vizsgált zöldség, a cékla színanyagainak szénhidrátemésztésre gyakorolt hatását vizsgáltam. A kutatáshoz az INFOGEST protokoll szerint elvégeztem az emésztésszimulációs folyamatot, mely során háromféle cékla kivonat (etanollal, desztillált vízzel és citromsav extrahált) hatását figyeltem meg. Szénhidrát forrásként a szabványban meghatározott receptúra alapján elkészített fehér kenyeret alkalmaztam. Az emésztésszimulációs folyamatok elvégzése után meghatároztam a minták glükóz-tartalmát, majd az eredményeket *Microsoft Office Excel* használatával értékeltem. Először vizsgáltam a glükóz felszabadulást az egyes kivonatok mellett, majd összehasonlítottam a különböző kezelések egymáshoz viszonyított hatását. Ezen felül értékeltem a betalain tartalom meghatározásából származó eredményeket, és glikémiás indexet is számítottam.

4.1. Betalain tartalom

Az emésztésszimulációhoz használt etanolos, desztillált vizes és citromsavas cékla kivonatok betacianin és betaxantin tartalmát előzetesen spektrofotometriás méréssel határoztam meg. Az ebből származó eredmények a 3. ábrán láthatók. A kék oszlopok a betacianint, a vörös oszlopok, pedig a betaxantint szemléltetik.

3. ÁBRA: CÉKLA KIVONATOK BETALAIN TARTALMA
(FORRÁS: SAJÁT SZERKESZTÉS)



A diagramon jól látható, hogy az etanolos kivonat betacianin és betaxantin tartalma a legnagyobb, vagyis ez a kezelés bizonyul a leghatékonyabbnak a színanyag kinyerés tekintetében. Student-féle t-próba alapján elmondható, hogy a desztillált vízzel és a citromsavval kezelt cékla kivonatok betacianin és betaxantin tartalma között $p=0,05$ szignifikancia szinten nem tapasztalható szignifikáns különbség. Az általam használt cékla kivonatokat az Élelmiszeripari Műveletek és Folyamattervezés Tanszék állította elő, egy kutatás keretében. A tanulmányban természetesen vizsgálták, a polifenolok és flavonoidok mellett, a cékla kivonatok betacianin tartalmát is. A vizsgálatok alapján a desztillált vízzel kezelt cékla kivonat betacianin tartalma bizonyult a legmagasabbnak, ami nem egyezik meg az általam végzett méréssel, miszerint az etanolos kivonat betacianin tartalma a legmagasabb (Moh Moh , Nagy, Bánvölgyi, Abrankó , & Arijit, 2022). Ez az eltérés feltehetően annak tudható be, hogy a méréshez használt etanolos cékla kivonatban található etanolt bepárlással előzetesen eltávolítottuk, így a kivonat színanyag tartalom tekintetében töményebbé válhatott.

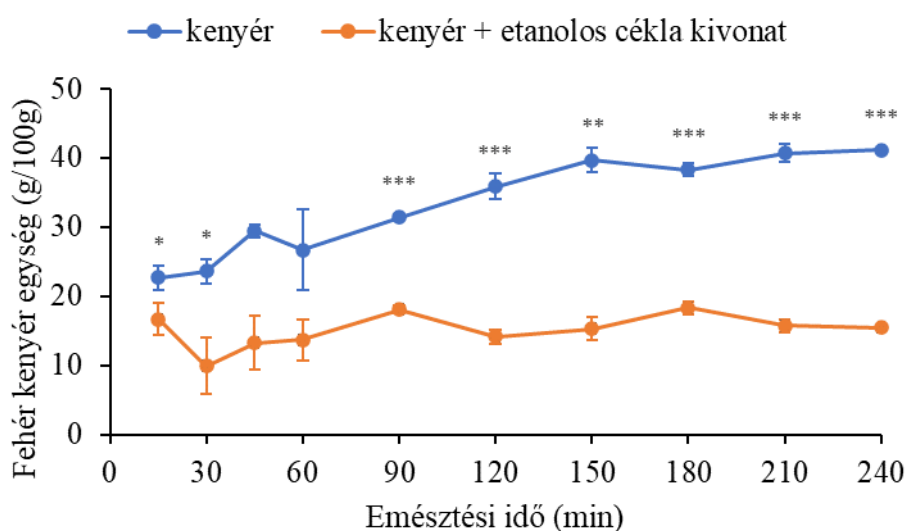
4.2.Cékla kivonatok hatása a szénhidrátemésztésre

A háromféleképpen kezelt cékla kivonatok szénhidrátok emésztésére gyakorolt hatását a felszabadult glükóz mennyiségéből határoztam meg. Ehhez a standard kenyér minta önálló emésztéséből származó adatokat alkalmaztam viszonyítási alapként. Az egyes kivonatok hatását előbb külön, majd egymáshoz viszonyítva tárgyalom.

4.2.1. Etanolos cékla kivonat

Az etanolos cékla kivonat elkészítése mikrohullámos extrakcióval történt, 50 V/V%- os etanol oldószer mellett. Az extrakciót követően az etanolt bepárlással távolítottuk el a kivonattól. Az emésztésszimuláció során több időpillanatban vettem mintát az emésztményből, amiből a felszabadult glükóz mennyiséget határoztam meg. A kivonat hatását standard fehér kenyér glükóz felszabadulásához hasonlítottam. Az adatokból készített felszabadulási görbék a 4. ábrán láthatók, ahol a kék görbe a referencia termék, vagyis a fehér kenyér, a narancssárga pedig az etanolos kivonattal együtt emésztett kenyér görbéje. Az egyes időpillanatokban vett mintákból mért eredmények összehasonlításához Student-féle t-próbát alkalmaztam.

4. ÁBRA: FELSZABADULT GLÜKÓZ ETANOLOS CÉKLA KIVONAT MELLETT. A JELÖLÉSEK A KÖVETKEZŐK: $P > 0,05$ ESETÉN NINCS JELÖLÉS; $P < 0,05$ ESETÉN *; $P < 0,01$ ESETÉN **; MÍG $P < 0,001$ ESETÉN ***. (FORRÁS: SAJÁT SZERKESZTÉS)



Az etanollal kezelt cékla kivonat felhasználása mellett jól láthatóan csökkent a felszabadult glükóz mennyisége. A kenyér mintából felszabadult glükóz kezdeti (22,7 g/100 g fehér kenyér (FK) és végpontja (41,1 g/100g FK) között 55,1%-os növekedés látható. Ezzel szemben az etanollal kezelt cékla kivonattal végzett vizsgálat pontjainál (16,7g/100g FK és 15,5g/100 g FK) 7,4%-os csökkenés tapasztalható. T-próba alapján $p=0,813$, vagyis nincs szignifikáns különbség a kezdeti és végpont között. Az ábrán látható jelölések alapján elmondható, hogy a cékla kivonat a teljes folyamat alatt módosította a felszabadulási folyamatot, így a fehér kenyér összes emészthetősége csökkent, illetve az emésztésért felelős enzimek aktivitása is mérséklődött.

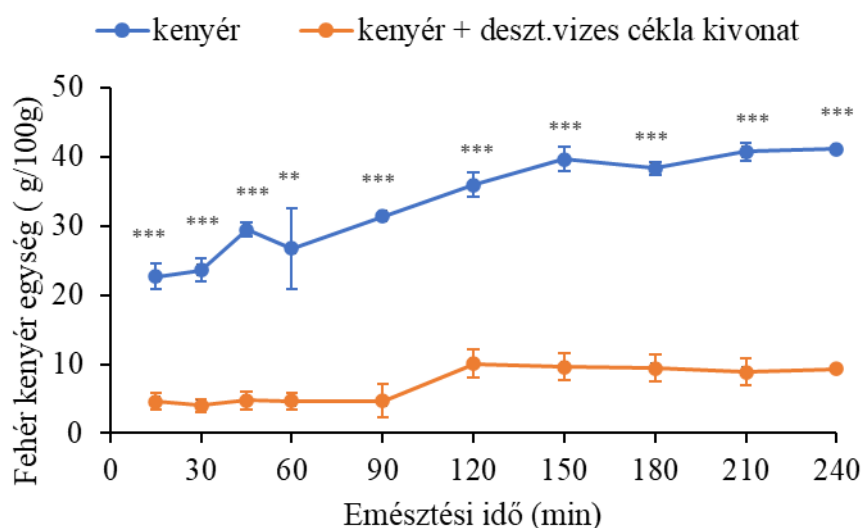
A cékla kivonat mellett az emésztés 30. percében jelentős esés látható a felszabadult glükóz mennyiségén. Ez feltehetőleg annak tudható be, hogy a gyomri szakaszban a proteolízis, vagyis a fehérjék hidrolízise jelentősebb, mint az amilolízis (Freitas & Le Feunteun, 2018). Több, az emésztési folyamat alatt vizsgált időpillanat esetén szignifikáns különbséget tapasztalhatunk a referencia termék és az etanolos cékla kivonat melletti glükóz felszabadulásban. A kivonat hatását kéttényezős varianciaanalízissel is vizsgáltam, mely alapján szintén elmondható, hogy a kivonat befolyásolja a szénhidrátemésztést, hiszen $p=0,0063$.

4.2.2. Desztillált vizes kivonat

A következő cékla kivonatot, amit alkalmaztam, desztillált víz mellett kezeltek mikrohullámú extrakcióval. Az emésztés során vett mintarészletekben felszabadult glükóz mennyisége az 5. ábrán található. A kék színnel jelölt görbe a standard fehér kenyér emésztéséből származó adatokat ábrázolja, míg a narancssárga a desztillált vizes kivonat mellett felszabadult glükóz mennyiségét. Az eredmények értékeléséhez szintén Student-féle t-próbát használtam.

5. ÁBRA: FELSZABADUL GLÜKÓZ DESZTILLÁLT VIZES CÉKLA KIVONAT MELLETT. A JELÖLÉSEK A KÖVETKEZŐK: $P > 0,05$ ESETÉN NINCS JELÖLÉS; $P < 0,05$ ESETÉN *; $P < 0,01$ ESETÉN **; MÍG $P < 0,001$ ESETÉN *.**

(FORRÁS: SAJÁT SZERKESZTÉS)



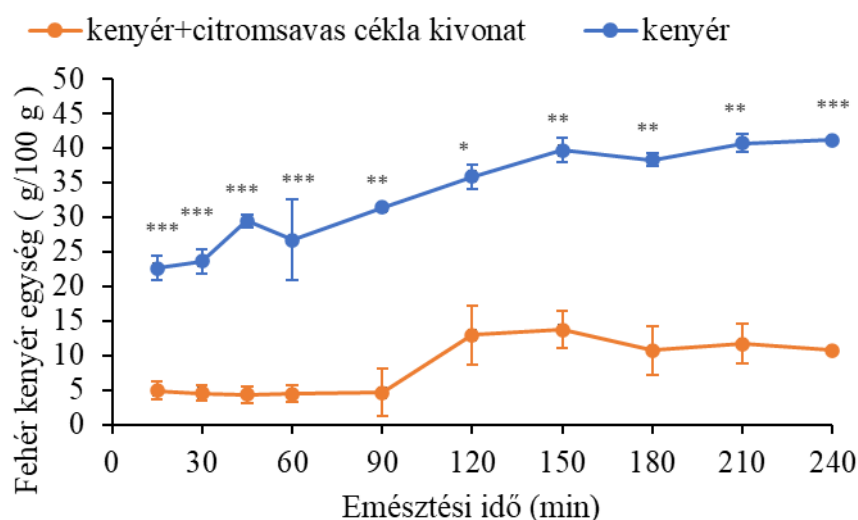
A desztillált vízzel kezelt cékla kivonathoz az egész folyamat alatt jelentősen csökkent a felszabadult glükóz mennyisége. Az emésztés végére, a 240. percben csupán csak 9,3 g/100g glükóz szabadult fel, a kezdeti 4,6g/100g mennyiséghez. A kezdeti- és végpontban felszabadult glükóz mennyiségében tehát nem tapasztalhatunk szignifikáns különbséget, hiszen $p=0,151$. A vizsgált időpillanatokban a cékla kivonat melletti felszabadulás szignifikánsan különbözik a referenciaként alkalmazott fehér kenyértől. Ugyanakkor érdemes megemlíteni, hogy a fehér kenyér önálló emésztése esetén 55,1%-os, míg a cékla kivonat mellett 49,4%-os növekedés tapasztalható a glükóz felszabadulásban. Tehát az emésztés lefolyása hasonló volt, viszont az egyes enzimek aktivitása jelentősen mérséklődött a desztillált vizes cékla kivonattal végzett emésztés során. A desztillált vizes kivonat melletti emésztéshez is elvégeztem a kéttényezős varianciaanalízist, $p=0,0095$, vagyis a hatás a kivonathoz köthető.

4.2.3. Citromsavas kivonat

A harmadik használt cékla kivonat elkészítése során a mikrohullámmal történő extrakcióhoz 0,05 m/m%-os citromsav oldatot alkalmaztak oldószerként. A citromsavas kivonat mellett történő emésztést ebben az esetben is standard fehér kenyér emésztése során felszabaduló glükózzal vettem össze, ami a 6. ábrán látható. Ahogy az előzőekben, a narancssárga görbe a cékla kivonat – kenyér emésztés során felszabadult glükóz mennyiségét mutatja, míg a kék, a viszonyításként használt referencia termék emésztéséből származó adatokat.

6. ÁBRA: FELSZABADULT GLÜKÓZ CITROMSAVAS CÉKLA KIVONAT MELLETT. A JELÖLÉSEK A KÖVETKEZŐK: $P > 0,05$ ESETÉN NINCS JELÖLÉS; $P < 0,05$ ESETÉN *; $P < 0,01$ ESETÉN **; MÍG $P < 0,001$ ESETÉN ***.

(FORRÁS: SAJÁT SZERKESZTÉS)



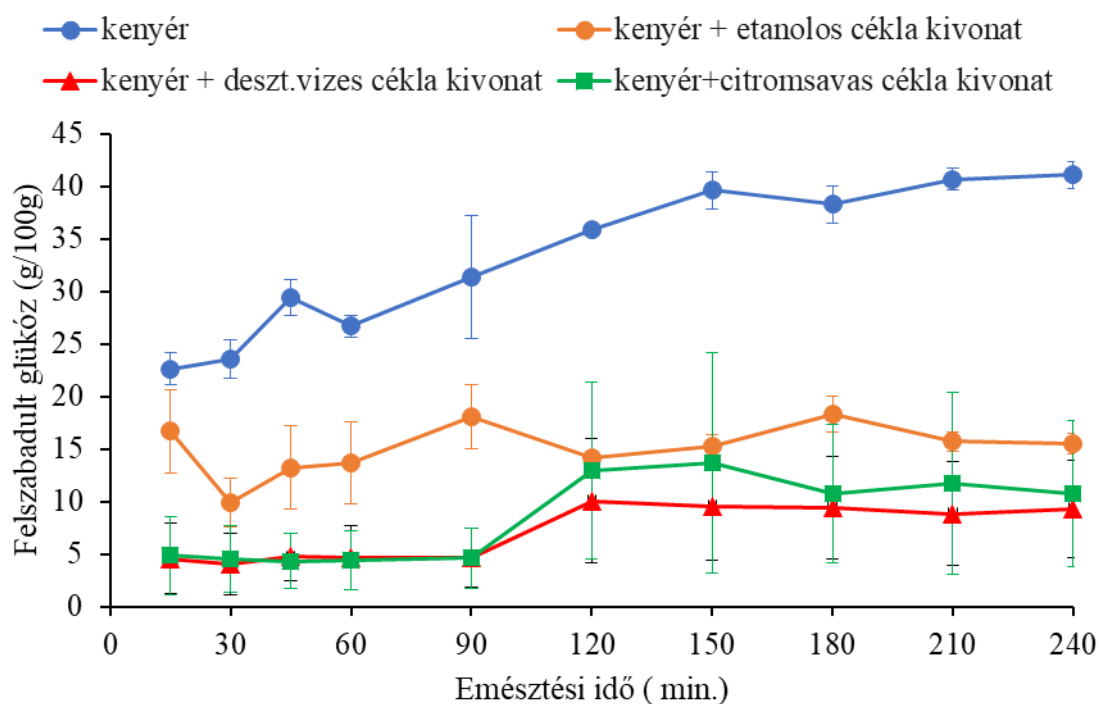
A citromsavval kezelt cékla kivonat használata mellett a szénhidrátemésztés drasztikusan csökkent a standard kenyér mintához képest ($p < 0,05$ minden pontban). A szimuláció végére kezdeti 4,9 g/100 g FK-ról csupán 10,8 g/100 g FK-ra növekedett a felszabadult glükóz mennyisége. A kezdeti és végpont között nincs szignifikáns különbség, hiszen $p = 0,182$. Ez feltehetőleg betudható annak, hogy a cékla kivonat citromsavas kezeléséből adódóan a kezdeti pH is igen alacsony volt. A kiindulási pH értékkel ($pH = 4,17$) kapcsolatban érdemes megemlíteni azt is, hogy a gyomri szakasz végére kialakítandó pH 2-es érték, a citromsavas kivonat használata mellett rövid idő alatt elérhető volt.

A 90. és 120. perc között gyors növekedés figyelhető meg a glükóz felszabadulást tekintve, hiszen ekkor a NaOH hozzáadásával a pH közel semleges tartományba tolódott el, ami optimális a vékonybél szakaszban működő enzimek hidrolíziséhez. A cékla kivonat mellett a 150. percben figyelhető meg a legnagyobb glükóz felszabadulás, 13,7g/100g. Az ábra alapján jól látszik, hogy a citromsavas kezelés hatása a gyomri szakaszban mutatkozik meg, míg a vékonybél szakaszban kevésbé. Ebből kifolyólag a citromsavas kivonat által kifejtett hatást inkább a savas jellege okozza, nem pedig a benne található polifenolok, amik minőségük alapján kevésbé hatnak a vékonybél szakaszban.

4.3. Kivonatok összehasonlítása

A különböző kivonatokkal végzett emésztésből származó eredményeket együttesen is értékeltem, ez a 7. ábrán látható. A narancssárga görbe az etanolos, a zöld a citromsavas, míg a piros a desztillált vizes cékla kivonat jelöli. A három kivonat mellett természetesen feltüntettem a diagrammon a referenciaként szolgáló standard kenyér minta glükóz felszabadulási profilját is.

7. ÁBRA: CÉKLA KIVONATOK GLÜKÓZ FELSZABADULÁSÁNAK ÖSSZEHAONLÍTÁSA
(FORRÁS: SAJÁT SZERKESZTÉS)



A cékla kivonatok görbéi alapján jól látható, hogy mindhárom kezelés mellett tapasztalható gátló hatás, ugyanakkor a mértékük eltérő.

A kiindulási pontban az etanolos kivonatnál 16,7 g/100g, a desztillált vizes kivonatnál 4,6 g/100g, míg citromsavas kivonatnál 4,9 g/100g glükóz szabadult fel. A végpontban felszabadult glükóz mindhárom kivonat használata mellett hasonló értéket ért el, etanolnál 15 g/100g-ot, desztillált víznél 9,3 g/100-ot míg citromsavnál 10,8 g/100g-ot, itt nem tapasztalhatunk szignifikáns különbséget a kivonatok között. Ugyan ezek az értékek jóval kisebbek a fehér kenyér önálló emésztése során felszabadult 41,1 g/100g glükóznál, fontos megemlíteni, hogy az egyes kezelések hatása eltérő módon nyilvánul meg az emésztési folyamat különböző szakaszaiban.

A narancssárgával jelölt, etanolos cékla kivonat használata során csak mérsékelt gátló hatás figyelhető meg a teljes emésztési folyamat alatt. Az etanolos kivonat mellett gyomri szakasz kezdeténél a desztillált vizes kivonathoz képest 72,4%-kal, a citromsavas kivonathoz pedig 70,8%-kal magasabb glükóz felszabadulást tapasztalhatunk. A legnagyobb különbség a 90. percben tapasztalható, itt az etanolos kivonat mellett 74,2% és 74,5 %-kal több glükóz szabadult fel, mint a másik két kivonat esetében. Az emésztésszimuláció 120. percében az etanollal kivont cékla extraktum mellett nagy csökkenés látható a görbén, a felszabadult 14,1 g/100g glükóz megközelíti a citromsavas kivonat esetén tapasztalható 13 g/100g mennyiséget, ami 8,4%-os különbséget jelent a glükóz felszabadulás tekintetében. A desztillált vizes és az etanolos kivonatok között az emésztés 90. ($p=0,015$), 180. ($p=0,031$) és 210. ($p=0,045$) percénél tapasztalható szignifikáns különbség. A t-próba alapján az etanollal és a citromsavval kezelt cékla kivonatoknál csupán a gyomri szakasz végén tapasztalhatunk szignifikáns eltérést $p=0,05$ szignifikancia szinten. A desztillált vízzel (piros görbe) és a citromsavval (zöld görbe) kezelt cékla kivonatok görbéinek lefutása igen hasonló egymáshoz, kiindulásnál 0,3 g, míg az emésztés végpontjánál 1,5 g különbség tapasztalható. A statisztikai elemzés alapján a citromsavval és a desztillált vízzel kezelt cékla kivonatok között nincs szignifikáns különbség. Mindkét kivonat esetén a gyomri szakaszban figyelhető meg gátlás, viszont ez eltérő módon valósul meg. A citromsavas kivonat esetén ez feltételezhetően a citromsav okozta alacsony pH miatt következik be. Ez a hatás a vékonybél szakaszban kevésbé mérsékli a glükóz felszabadulást, hiszen a 90. és 120. percben 64,61%-os növekedés tapasztalható a felszabadult glükóz mennyiségében.

A desztillált vízzel kezelt kivonatnál a gyomri szakaszban szintén nagy mértékű gátlás tapasztalható, viszont ez a hatás a vékonybél szakaszban mérséklődik, a 120. percben 53,5%-kal nő a glükóz felszabadulás.

Egy mikrohullámú extrakcióval végzett kutatás eredményeként elmondható, hogy a folyamat során desztillált víz használata mellett tapasztalható a kivonatban a legnagyobb betalain és polifenol tartalom (Moh Moh , Nagy, Bánvölgyi, Abrankó , & Arijit, 2022). Ebből következtethetünk arra, hogy a gátló hatást valóban ezek a bioaktív komponensek okozzák.

Az emésztési folyamattal kapcsolatban érdemes megjegyezni, hogy annak ellenére, hogy a citromsavas kivonat mellett a kiindulási pH alacsonyabb volt, mint a többi mintánál, átlagosan 122,5 µl HCl-ot kellett a gyomri szakasznál adagolni, ami megegyezik a desztillált vizes kivonathoz alkalmazandó mennyiséggel. Az etanolos cékla kivonat esetében ez a mennyiség 130 µl volt. Ez magyarázható azzal, hogy egyes polifenolok, például a flavonoidok viselkedhetnek pufferként (Tormási, Benes, Matkovits, & Abrankó, 2024).

Továbbá jól látható az is, hogy a gátló hatás nem a rendszerben lévő savakhoz köthető, hiszen a citromsavval és desztillált vízzel kezelt cékla kivonatok között például nem tapasztaltunk szignifikáns különbséget a felszabadult glükóz mennyiség tekintetében.

4.4. Glikémiás index számítás

Mérési folyamatok részeként meghatároztam a glikémiás indexet (GI) is, az emészthető szénhidrátok egyik jellemzőjét, ami megmutatja milyen mértékben emelik meg a vércukorszintet.

A különböző cékla kivonatok fehér kenyérhez (GI=71) viszonyított glikémiás indexe a 2. táblázatban látható.

2. TÁBLÁZAT: KIVONATOK GLIKÉMIÁS INDEXE
(Forrás: Saját szerkesztés)

cékla kivonatok	glikémiás index	iAUC	CV%	n
etanolos kivonat	30	75,9±19,1	25%	4
desztillált vizes kivonat	13	34,4±9,04	26%	4
citromsavas kivonat	56	144,9±32,9	25%	4

A számítás alapján elmondható, hogy a kivonatok valóban okozhatnak gátlást a szénhidrátemésztés során, melynek hatása a GI-ben is megjelenik. Az eredmények szerint a desztillált vízzel kezelt cékla kivonat vércukorszint emelő hatása a legkisebb.

Ez alátámasztja az emésztés során felszabaduló glükóz mennyiségének vizsgálatából származó eredményeket, miszerint ez a kivonat van a legnagyobb hatással a szénhidrátemésztésre.

Továbbá annak ellenére, hogy a felszabadult glükóz mennyiséget tekintve a citromsavas kivonatnál is nagyobb mértékű gátlást tapasztalhattunk, ennek a legmagasabb a glikémiás indexe. Erre lehet az a magyarázat, hogy a citromsavas kivonatban több eredendő cukor található meg, mint a többi kivonatban. Emellett a citromsav rendelkezik glikémiás index csökkentő hatással, hiszen növeli a rezisztens keményítő frakciók mennyiségét, illetve gátolja a keményítő hidrolízisét, ezzel mérsékelve a felszabaduló glükóz mennyiségét (Shaikh, Mohsin Ali, Mustafa, & Abid Hasnain, 2019) (Lee & Seo, 2019). Ez megmutatkozik abban, hogy a standard fehér kenyérhez képest a citromsavas kivonat mellett 21,1%-kal csökkent a glikémiás index.

5. Következtetések és javaslatok

Manapság egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek a funkcionális élelmiszerek, melyek komponenseik által pozitív hatást gyakorolhatnak az emberi szervezetre, így szerepet játszhatnak egyes krónikus betegségek, például a diabétesz megelőzésében. Emellett a táplálkozási trendek miatt egyre több fogyasztó fordít figyelmet arra, hogy olyan termékeket válasszon, melyek nem tartalmaznak mesterséges színezékeket. Ennek okán az iparban elkezdtek számos, zöldségekben és gyümölcsökben fellelhető, természetes színyanyagokat alkalmazni színezékként. Ezek az anyagok legtöbb esetben bioaktív komponensek, melyek gyakorolhatnak pozitív hatásokat az emberi szervezetre. A cékla bioaktív komponenseinek szénhidrátemésztésre gyakorolt hatásának vizsgálatához először meghatároztam az egyes kivonatok betalain tartalmát. Az emésztésszimulációs mérésekhez három, etanollal, desztillált vízzel és citromsavval kezelt cékla kivonatot alkalmaztam. A betalain-tartalmat a színyanyagok elnyelése alapján állapítottam meg spektrofotometriás módszerrel, mely eredményei alapján elmondható, hogy a mikrohullámú extrakció során használt oldószerek közül az etanol mellett vonható ki a legnagyobb mennyiségű betaxantin és betacianin. Míg a vizes és a citromsavas vizes extrakció ehhez képest körülbelül harmad annyi mennyiségben volt képes kivonni ezeket a bioaktív komponenseket.

Ezeket a kivonatok emésztésszimulációs kísérletek segítségével teszteltem annak érdekében, hogy meghatározzam a szénhidrátemésztésre, ezen belül a folyamatban résztvevő enzimek – nyálamiláz és hasnyálamiláz – aktivitására gyakorolt hatásukat. Ehhez az INFOGEST protokoll módosított változatát, egy hibrid emésztési módszert alkalmaztam, mely a szénhidrátok emésztését realisztikusabban követi le. A szimuláció során vett minták glükóz-tartalma alapján vizsgáltam a szénhidrátemésztés kinetikáját – felszabadulási profil – és meghatároztam a kivonatok által módosított glikémiás indexet, melyhez referenciaként standard fehér kenyér emészthetőségét és általánosan elfogadott glikémiás indexét (GI=71) vettem alapul.

Az eredmények alapján legnagyobb gátlás a desztillált vizes és citromsavas kivonatokkal érhető el. Az emésztésszimulációs folyamat kezdeti szakaszán a standard fehér kenyérhez viszonyítva 79,7%-kal, illetve 78,4%-kal kevesebb glükóz szabadult fel a cékla extraktumok használata mellett. Az emésztés végére referencia termékhez viszonyítva a desztillált vizes cékla kivonat esetén 77,4%-kal, míg a citromsavas kivonat mellett 73,7%-kal kevesebb glükóz szabadult fel.

Azonban a felszabadulási profil és a megfigyeléseim alapján a két kivonat feltehetően eltérő hatásmechanizmus alapján éri el a kívánt hatást. Az etanolos cékla kivonat mellett a glükóz felszabadulás kezdeti pontban 26,4%-kal, míg a végpontban 62,3%-kal csökkent a referencia termékhez képest. Tehát az etanolos kivonat hozzáadásával is sikerült jelentős mértékű gátlást elérni, hiszen a referenciaként használt fehér kenyérhez képest az emésztés 45. és 60. perce kivételével, a teljes folyamat alatt szignifikáns különbség látható a felszabadult glükóz mennyiségében. Azonban ez a gátlás jelentősen elmaradt mind a desztillált vizes, mind a citromsavas minták által kiváltott hatástól.

A glikémiás indexben bekövetkezett változások azonban nem követik ezt a trendet. Ebben az esetben legnagyobb GI csökkenést (81,7%) a vizes kivonattal lehetett elérni (GI=13), ezt követte az etanolos (GI=30) és a citromsavas (GI=56). Ennek az oka feltehetően a citromsavas kivonat nagyobb eredendő glükóz-tartalma volt, melyet a GI számolásnál figyelembe kell venni, mint gyorsan felszívódó szénhidrát, míg a felszabadulási görbe ábrázolása esetén ezzel az értékkel korrigáltam az eredményeket – mivel ebben az esetben a fehér kenyér szénhidrátemésztési profiljában való eltéréseket vizsgáltam.

Ezen mérési eredmények alapján elmondható, hogy a céklában megtalálható bioaktív komponensek valóban hatással vannak a szénhidrátemésztésre. Továbbá a cékla kivonatok elkészítése során alkalmazott oldószer befolyásolja az emésztésre gyakorolt hatást, hiszen a legnagyobb glükóz felszabadulás gátló hatást a desztillált vízzel kezelt cékla kivonat esetén tapasztaltam. Ezt a glikémiás index számításból származó eredmények is alátámasztották, hiszen a desztillált vizes extraktum glikémiás indexe lett a legalacsonyabb (GI=13).

A cékla bioaktív komponenseinek szénhidrátemésztésre gyakorolt hatásainak megfigyelésére további vizsgálatok is szükségesek. Az emésztés szimulációhoz a hibrid emésztésszimulációs modellt alkalmaztam. A szájüregi szakaszt *in vivo* körülmények között végeztem el, viszont a szimuláció többi szakaszához *in vitro*, statikus INFOGEST protokollt alkalmaztam. Érdeemes lenne a folyamatot dinamikus *in vitro* emésztési modellel is elvégezni, hiszen ez szemlélteti az emésztőrendszer perisztaltikus mozgását. Ugyanakkor az *in vitro* mérések másik hátránya, hogy a vastagbélben lejátszódó fermentációs folyamatok például nem modellezhetők, és ez fontos lehet a bioaktív komponensek emésztésre gyakorolt hatása kapcsán. Ennek okán érdemes a cékla hatásait *in vivo* körülmények között vizsgálni, hiszen így a szénhidrátemésztés teljes folyamata megfigyelhetővé válna.

Emellett a szénhidrát felszabadulás vizsgálatához célszerű lenne HPLC módszerrel végzett mérést is elvégezni. Ezzel a módszerrel összetettebb képet kaphatunk arról, hogy milyen hidrolízis termékek keletkeztek az emésztés során.

6. Összefoglalás

Az emberi szervezet egyik fő energiaforrásként a szénhidrátok szolgálnak, melyeket emészthetőség és felszívódás tekintetében is érdemes vizsgálni. A szénhidrátok egyik fontos tulajdonsága, hogy befolyásolják a vércukor- és így az inzulinszintet is, melynek szemléltetésére használható a glikémiás index. A magas glikémiás indexszel rendelkező élelmiszerek túlzott fogyasztása számos krónikus betegség, például diabétesz kialakulásához vezethet. Manapság nagy népszerűségnek örvendenek a különböző funkcionális élelmiszerek, melyek mellett, hogy tápanyagforrásként funkcionálnak, egyéb pozitív hatást gyakorolnak az emberi szervezetre (Olanira & Osemwegie, 2023). Ezek az élelmiszerek szerepet játszhatnak a krónikus kórképek megelőzésében. Számos zöldség és gyümölcs tartalmaz bioaktív komponenseket, melynek köszönhetően funkcionális élelmiszernek tekinthetők. Ezek az anyagok legtöbb esetben természetes színanyagok, mint például a betalainok, melyekkel helyettesíthetők az iparban használt, nem túl jó megítéléssel rendelkező mesterséges színezékek. A bioaktív komponensek emésztésének megfigyelésére leggyakrabban *in vivo* kísérleteket valósítottak meg. Ezek helyettesítésére születtek meg az *in vitro* emésztési modellek, melyek reprodukálhatóbbak, egyszerűbben megvalósíthatók és kevésbé költségesek, ugyanakkor jól szemléltetik az emberi szervezetben lejátszódó folyamatokat és azok körülményeit. Az egyik leggyakrabban alkalmazott modell a 2014-ben kidolgozott INFOGEST protokoll, ami egy statikus, *in vitro* modell. Dolgozatomban a cékla bioaktív komponenseinek szénhidrátemésztésre gyakorolt hatását vizsgáltam az INFOGEST emésztés szimulációs modellel. A mérésekhez az Élelmiszeripari Műveletek és Folyamattervezési Tanszék által elkészített, etanollal, desztillált vízzel és citromsavval kezelt cékla kivonatokat használtam és ezek hatásait figyeltem meg. Szénhidrát forrásként egy szabványban meghatározott recept szerint elkészített standard, fehér kenyeret alkalmaztam. A kezelt cékla kivonatok betalain tartalmát előzetesen spektrofotométerrel határoztam meg. Ezután elvégeztem az emésztésszimulációt, meghatározott időközönként történő mintavétellel. A mintarészletekben a felszabadult glükóz mennyiségét szintén spektrofotometriás mérés segítségével mértem meg, illetve glikémiás indexet is számoltam.

Az eredmények összevetésével megállapítottam, hogy az egyes cékla kivonatoknak milyen hatása volt a glükózfelszabadulásra, így a szénhidrátemésztésre.

A mérések eredményeként elmondható, hogy mindhárom cékla kivonat hatással volt a szénhidrátemésztésre. A referenciaként alkalmazott standard fehér kenyérhez képest az etanolos kivonatnál 62,3%-kal, a desztillált víz mellett 77,4%-kal, míg a citromsavnál 73,7%-kal kevesebb glükóz szabadult fel az emésztési folyamat végére. A legnagyobb gátló hatással a desztillált vízzel készített cékla kivonat rendelkezik. Ezt a glikémiás index számításból származó eredmények is alátámasztják, hiszen ezen kivonat használata mellett $GI=13$, a fehér kenyér $GI=71$ értékéhez képest. A citromsavas kivonat szintén jelentős gátló hatással bírt, a glükóz felszabadulás megfigyelésére készített görbe lefutása nagyon hasonló volt a desztillált vizes kivonat eredményeiből készített görbéhez. Ugyanakkor ennél a kivonatnál tapasztalható a legnagyobb glikémiás index ($GI=56$), ami nem tükrözi az emésztési folyamat alatti glükóz felszabadulásból származó eredményeket. Az etanolos cékla kivonat használata során tapasztalható a legkisebb glükóz felszabadulás gátló hatás, ugyanakkor a $GI=30$, vagyis az etanolos kivonat mellett kisebb a glikémiás index, mint a citromsavas cékla kivonat mellett.

Ahhoz, hogy még több információt kapjunk a céklában fellelhető bioaktív komponensek szénhidrátemésztésre gyakorolt hatásáról, érdemes lenne dinamikus *in vitro* modellel is elvégezni az emésztésszimulációt. Továbbá célszerű lenne *in vivo* körülmények között is vizsgálni az emésztést, hiszen ezek a vizsgálatok a teljes tápcsatornát és folyamatait, például a fermentációt is tükrözik. Emellett az emésztés egyes szakaszaiban vett mintarészletek vizsgálatához célszerű HPLC mérést is végezni, hiszen ennek eredményeként összetettebb képet kaphatunk a szénhidrátemésztés során keletkező hidrolízis termékekről.

Az elvégzett hibrid emésztésszimulációs modell eredményei alapján elmondható, hogy a céklában előforduló bioaktív komponensek valóban hatással vannak a szénhidrátemésztésre. Ez megmutatkozik a folyamat során felszabadult glükóz mennyiségében, valamint a glikémiás index számítás során is.

7. Irodalomjegyzék

- Abraham Cardoso-Ugarte, G., & Liceaga, A. (2014). *Microwave-assisted extraction of betalains from red beet (Beta vulgaris)* . Forrás: 10.1016/j.lwt.2014.05.025
- Nowacka, M., Tappi, S., Wiktor, A., & Rybak, K. (2019). *The Impact of Pulsed Electric Field on the Extraction of Bioactive Compounds from Beetroot*. Forrás: 10.3390/foods8070244
- Adeboye, P., Bettiga, M., & Olsson, L. (2014). *The chemical nature of phenolic compounds determines their toxicity and induces distinct physiological responses in Saccharomyces cerevisiae in lignocellulose hydrolysates*. Forrás: 10.1186/s13568-014-0046-7
- Al-Harbi, L. (2021). *Beta vulgaris L. (Beetroot) Methanolic Extract Prevents Hepatic Steatosis and Liver Damage in T2DM Rats by Hypoglycemic, Insulin-Sensitizing, Antioxidant Effects, and Upregulation of PPARα*. Forrás: <https://doi.org/10.3390/biology10121306>
- Aliano-González , M., & Carrera, C. (2021). *A comparison study between ultrasound–assisted and enzyme–assisted extraction of anthocyanins from blackcurrant (Ribes*. Forrás: 10.1016/j.fochx.2021.100192
- Antolak, H., & Kregiel, D. (2017). *Food preservatives from plants (pp. 45– 85). Food Additives, IntechOpen*. Forrás: 10.5772/intechopen.70090
- Atkinson, F., Brand-Miller, J., Foster-Powll, K., Buyken, A., & Goletzke, J. (2021). *International tables of glycemic index and glycemic load values 2021: A systematic review. Am. J. Clin. Nutr, 114, 1625–1632*. Forrás: 10.1093/ajcn/nqab233
- Babarykin , D., Smirnova , G., Pundinsh, I., Vasiljeva, S., Krumina G , & et al. (2019). *Red beet (Beta vulgaris) Impact on human health. Journal of Biosciences and Medicines 7: 61 - 79*. Forrás: 10.4236/jbm.2019.73007
- Boisen, S., & Eggum, B. (1991). *PubMed*. Forrás: Critical evaluation of in vitro methods for estimating digestibility in simple-stomach animals: 10.1079/NRR19910012
- Bornhorst, G., & Singh, R. (2012). *Bolus formation and disintegration during digestion of food carbohydrates. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 11 (2), 101–118*. Forrás: 0.1111/j.1541-4337.2011.00172.x
- Brodkorb, A., Egger, L., Alming, M., & et al. (2019). *INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. Nature Protocols, 14 (4). pp. 991-1014. ISSN 1754-2189*. Forrás: 10.1038/sj.ejcn.1602937

- Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., & et al. (2019). *INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion*. *Nature Protocols*, 14 (4). pp. 991-1014. ISSN 1754-2189. Forrás: <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1>
- Byrne, C., Chambers, E., Morrison, D., & Frost, G. (2015). *The role of short chain fatty acids in appetite regulation and energy homeostasis*. Forrás: 10.1038/ijo.2015.84
- Capper, T., Houghton, D., Stewart, C., Blain, A., McMahon, N., Siervo, M., . . . Stevenson, E. (2020). *Whole beetroot consumption reduces systolic blood pressure and modulates diversity and composition of the gut microbiota in older participants*. *NFS Journal*, 21, 28–37. Forrás: 10.1016/j. nfs.2020.08.001
- Castro - Vargas , H., & Baumann, W. (2019). Valorization of papaya (*Carica papaya* L.) agroindustrial waste through the recovery of phenolic antioxidants by supercritical fluid extraction. *Journal of Food Science and Technology*.
- Cattevelli, A., Zannini, M., & Conte, A. (2024). Inhibition of starch hydrolysis during in vitro co-digestion of pasta with . *Food Bioscience*.
- Chen, L., & Ding, L. (2008). *Dynamic microwave-assisted extraction of flavonoids from Herba Epimedii*. Forrás: 10.1016/j.seppur.2007.05.025
- Copeland, L., & Blazek, J. (2009). Form and fuctionality of starch. *Food Hydrocolloids*.
- Cummings, J., & Stephen, A. (2007). *European Journal of Clinical Nutrition*.
- Czyzowska, A., Klewicka , E., & Libudzisz, Z. (2006). *The influence of lactic acid fermentation process of red beet juice on the stability of biologically active colorants*. *European Food Research and Technology*, 223, 110–116. Forrás: 10.1007/s00217-005-0159-y
- Daliri, E., Balnionyte, T., Stankeviciute, J., Lastauskiene, E., Meskys, R., & Burokas , A. (2023). *High temperature lacto-fermentation improves antioxidant and antidiabetic potentials of Lithuanian red beetroot*. *LWT-Food Science and Technology*, 185, Article 115122. Forrás: 10.1016/j.lwt.2023.115122
- de Oliveira, S., do Nascimento, H., Sampaio, K., & de Souza , E. (2021). *A review on bioactive compounds of beet (Beta vulgaris L. subsp. vulgaris) with special emphasis on their beneficial effects on gut microbiota and gastrointestinal health*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61, 2022–2033. Forrás: 10.1080/10408398.2020.1768510
- Directive 2001/20/EU. (dátum nélk.). *Directive 2001/20/EU, 2001. No 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 4 April 2001 on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to the*

- implementation of good clinical practice*. Forrás:
<http://data.europa.eu/eli/dec/2015/1814/oj>
- Donohoe, D., Garge, N., Zhang, X., Sun, W., O'Connell, T., Bunger, M., & et al. (2011). *The microbiome and butyrate regulate energy metabolism and autophagy in the mammalian colon*. *Cell Metab*.
- Egger, L. (2016). *The harmonized INFOGEST in vitro digestion method: From knowledge to 1119 action*. *Food Res. Int.* 88, 217-225. Forrás: 10.1016/j.foodres.2015.12.006
- Egger, L., & et al. (2017). *Physiological comparability of the harmonized INFOGEST in vitro digestion 1121 method to in vivo pig digestion*. *Food Res. Int.* 102, 567-574. Forrás: 10.1016/j.foodres.2017.09.047
- Englyst, K., Liu, S., & Englyst, H. (2007). *Nutritional characterization and measurement of dietary carbohydrates*. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61, S19–S39. Forrás: 10.1038/sj.ejcn.1602937
- Fabian Battistella Lasta, H., Lentz, L., & Mezzomo, N. (2019). *Supercritical CO₂ to recover extracts enriched in antioxidant compounds from beetroot aerial parts*. Forrás: 10.1016/j.bcab.2019.101169
- Farias, D., & Araújo, F. (2021). Antidiabetic potential of dietary polyphenols: A mechanistic review. *Food Research International*.
- Farias, D., & Araújo, F. (2021). Antidiabetic potential of dietary polyphenols: A mechanistic review. *Food Research International*.
- Ferey-Roux, G., Perrier, J., & Forest, E. (1998). The human pancreatic K-amylase isoforms: isolation, structural studies and kinetics of inhibition by acarbose.
- Fernández, C., & et al. (2017). *Rethinking the starch digestion hypothesis for AMY1 copy number variation in humans*. Forrás: 10.1002/ajpa.23237
- Ferrua, M., & Singh, R. (2010). *Modeling the fluid dynamics in a human stomach to gain insight of food digestion*. *J. Food Sci.* 75 (7), R151–R162. Forrás: 10.1111/j.1750-3841.2010.01748.x
- Freitas, D., & Le Feunteun, S. (2017). *The important role of salivary α -amylase in gastric digestion of wheat bread starch*. Forrás: 10.1039/C7FO01484H
- Freitas, D., & Le Feunteun, S. (2018). *(Freitas & Le Feunteun, Oro-gastro-intestinal digestion of starch in white bread, wheat-based and gluten-free pasta: Unveiling the contribution of human salivary α -amylase, 2018)*. Forrás: 10.1016/j.foodchem.2018.09.025

- Freitas, D., & Le Feunteun, S. (2019). Oro-gastro-intestinal digestion of starch in white bread, wheat-based and gluten-free pasta: Unveiling the contribution of human salivary α -amylase. *Food Chemistry*, 566-573.
- Ganzer, M., & Zwerger Michael. (2021). *Analysis of natural products by SFC – Applications from 2015 to 2021*. Forrás: 10.1016/j.trac.2021.116463
- Gardner, J., & et al. . (2002). Measurement of meal-stimulated gastric acid secretion by in vivo gastric autotitration. *Journal of Applied Physiology*.
- Giubreti, G., & Rocchetti, G. (2020). Interactions between phenolic compounds, amylolytic enzymes and starch: an updated overview. *Food Science*.
- Gong, S., Jiao, C., & Liu, B. (2023). Beetroot (*Beta vulgaris*) extract exerts an antibacterial effect by inducing. *Journal of Functional Foods*.
- Guerra, A., Denis, S., le Goff, O., Sicardi, V., Francois, O., Yao, A., . . . Blanquet-Diot, S. (2016). . *Development and validation of a new dynamic computer-controlled model of the human stomach and small intestine*. *Biotechnol. Bioeng.* 113 (6), 1325–1335. Forrás: 10.1002/bit.25890
- Gurung, M., Li, Z., You, H., Rodrigues, R., Jump, D., Morgun, A., & Shulzhenko, N. (2020). *Role of gut microbiota in type 2 diabetes pathophysiology*. *EBioMedicine*, 51, Article 102590. Forrás: 10.1016/j.ebiom.2019.11.051
- Han, Y., Haraguchi, T., Iwanaga, S., Tomotake, H., Okazaki, Y., Mineo, S., . . . Kato , N. (2009). *Consumption of some polyphenols reduces fecal deoxycholic acid and lithocholic acid, the secondary bile acids of risk factors of colon cancer*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(18), 8587–8590. Forrás: 10.1021/jf900393k
- Hazervazifeh, A., & M. Nikbakht, A. (2019). *Industrial microwave dryer: An effective design to reduce non-uniform heating*. Forrás: 10.1016/j.eaef.2019.12.001
- Henning, S., Yang, J., Shao, P., Lee, R., Huang J.Ly.A., Hsu, M., . . . Li, Z. (2017). *Health benefit of vegetable/fruit juice-based diet: Role of microbiome*. *Scientific Reports*, 7, 2167. Forrás: 10.1038/s41598-017-02200-6
- Hoang, C., & Nguyen, M. (2017). *Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts*. Forrás: 10.1002/fsn3.546
- Jenkins, A. (2002). *Depression of the glycemic index by high levels of β -glucan fiber in two functional foods tested in type 2 diabetes*. Forrás: <https://www.nature.com/articles/1601367>
- Jenkins, A., Kacinik, V., Lyon, M., & Wolever, T. (2010). *Reduction of postprandial glycemia by the novel viscous polysaccharide PGX, in a dose-dependent manner*,

- independent of food form. *Journal of the American College of Nutrition*, 29, 92–98.
Forrás: 10.1080/07315724.2010.10719821
- Jiang, S., Young, J., Wang, K., Qian, Y., & Cai, L. (2020). *Diabetic-induced alterations in hepatic glucose and lipid metabolism: The role of type 1 and type 2 diabetes mellitus. Molecular Medicine Reports*, 22, 603–611. Forrás: 10.3892/mmr.2020.11175
- Jourdren, S. (2016). Breakdown pathways during oral processing of different breads: impact of crumb and crust structures. *Food&Function*.
- Kamiri, A., & Kazemi, M. (2021). Bioactive compounds from by-products of eggplant: Functional properties, potential applications and advances in valorization methods. *Trends in Food Science & Technology*.
- Kaur, M., Misra, S., & Swarnkar, P. (2023). Understanding the role of hyperglycemia and the molecular mechanism associated with diabetic neuropathy and possible therapeutic strategies.
- Ko, J., Kim, S., Ahn, H., Go, J., Ryu, Y., Lee, W., . . . Kim, Y. (2022). *Characterization of a lactic acid bacterium-derived β -glucosidase for the production of rubusoside from stevioside. Enzyme and Microbial Technology*, 153, Article 109939. Forrás: 10.1016/j.enzmictec.2021.109939
- Kumar , A., & Bin Liew, K. (2020). Supercritical Fluid Technology and its Pharmaceutical Applications: A Revisit with Two Decades of Progress. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*.
- Kumar , S., & Su-Ling Brooks, M. (2018). *Use of Red Beet (Beta vulgaris L.) for Antimicrobial Applications—a Critical Review*. Forrás: 10.1007/s11947-017-1942-z
- Kumorkiewicz - Jarmo, A., Swiegrosz , T., Sutor , K., Sporna - Kucab, A., & Wybraniec, S. (2021). *Multi-colored shades of betalains: Recent advances in betacyanin chemistry. Natural Product Reports*, 38, 2315–2346. Forrás: 10.1039/D1NP00018G
- Lee, N., & Seo, J.-M. (2019). Citric-acid treatment during rice processing increases the level of slowly digestible starch with a potential to regulate the post-prandial blood glucose level. *Journal of cereal science*.
- Li, C., Hu, Y., & Gong, B. (2021). Causal relations among starch fine molecular structure, lamellar/crystalline structure and in vitro digestion kinetics of native rice starch. *Food Foncticon*.
- Li, C., Yu, W., Wu, P., & Chen, X. (2020). *Current in vitro digestion systems for understanding food digestion in human upper gastrointestinal tract. Trends Food Sci. Technol*. Forrás: 10.1016/j.tifs.2019.12.015

- Lidström, P., Tierney, J., & Wathey, B. (2001). Microwave assisted organic synthesis - a review. *Tetrahedron*.
- Liu, W., Ye, A., Han, F., & Han, J. (2019). *Advances and challenges in liposome digestion: surface interaction, biological fate, and GIT modeling*. *Adv. Colloid Interface Sci.* 263, 52–67. Forrás: 10.1016/j.cis.2018.11.007
- Lombardelli, C., Benucci, I., & Mazzocchi, C. (2021). *A Novel Process for the Recovery of Betalains from Unsold Red Beets by Low-Temperature Enzyme-Assisted Extraction*. Forrás: 10.3390/foods10020236
- M.M., Z., Márki, E., & Bánvölgyi, S. (2020). Conventional extraction of betalain compounds from beetroot peels with aqueous ethanol solvent. 163 - 169.
- Maraie, N., Abdul-Jalil, T., Alhamdany, A., & Janabi, H. (2014). *Phytochemical study of the Iraqi Beta vulgaris leaves and its clinical applications for the treatment of different dermatological diseases*. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3, 5–19.
- Mella, C., Vega-G'alvez, A., Uribe, E., Pasten, A., Mejias, N., & Quispe-Fuentes, I. (2022). *Impact of vacuum drying on drying characteristics and functional properties of beetroot (Beta vulgaris)*. *Applied Food Research*, 2, Article 100120. Forrás: 10.1016/j.afres.2022.100120
- Michlmayr, H., & Kneifel, W. (2014). *β -Glucosidase activities of lactic acid bacteria: Mechanisms, impact on fermented food and human health*. *FEMS Microbiology Letters*, 352, 1–10. Forrás: 10.1111/1574-6968.12348
- Minekus, M., & et al. (2014). *A standardised static in vitro digestion method suitable for food - an 1117 international consensus*. *Food & Function* 5, 1113-1124,. Forrás: 10.1039/C3FO60702J
- Moghaddas kia, E., Ghaderzadeh, S., & Mojaddar Langroodi, A. (2020). Red beet extract usage in gelatin/gellan based gummy candy formulation introducing Salix aegyptiaca distillate as a flavouring agent. *Journal of Food Science and Technology*. Forrás: 10.1007/s13197-020-04368-8
- Moh Moh, Z., & Bánvölgyi, S. (2023). Emerging technology approach for extractability of betalains from the peel of beetroot (Beta vulgaris L.) . *Biomass conversion and biorefinery*.
- Moh Moh, Z., Nagy, K., Bánvölgyi, S., Abrankó, L., & Arijit, N. (2022). Effect of microwave pretreatment on the extraction of antioxidant rich red color betacyanin phenolic and flavonoid from the crown of Cylindra-type beetroot (Beta vulgaris L.). *Journal of food process engineering*.

- Monteiro Cordeiro De Azeredo, H. (2009). *Betalains: Properties, sources, applications, and stability - A review*. Forrás: 10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x
- Nadar, S., & Rao, P. (2018). Enzyme assisted extraction of biomolecules as an approach to novel extraction technology: A review. *Food Research International*, 309-330.
- Neelwarne, B., & Halagur, S. (2013). *Red beet: An overview, Red Beet Technology - Food and Pharmaceutical applications*. Forrás: 10.1007/978-1-4614-3458-0
- Nemzer, B., Pietrkowski, Z., Sporna, A., Stalica, P., Thresher, W., Michalowski, T., & Wybraniec, S. (2011). *Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (Beta vulgaris L.) dried extracts*. *Food Chemistry*, 127, 42–53. Forrás: 10.1016/j.foodchem.2010.12.081
- Ng., S., Xu, Z., Mak, J., Yang, K., Liu, Q., Zuo, T., . . . Wong, S. (2022). *Microbiota engraftment after faecal microbiota transplantation in obese subjects with type 2 diabetes: A 24-week, double-blind, randomised controlled trial*. *Gut*, 71, 716–723. Forrás: 10.1136/gutjnl2020-323617
- Odriozola-Serrano, I., Soliva - Fortuny, R., & Martín - Belloso, O. (2008). Phenolic acids, flavonoids, vitamin C and antioxidant capacity of strawberry juices processed by high-intensity pulsed electric fields or heat treatments. *European Food Research and Technology*, 239-248.
- Olanira, A., & Osemwegie, O. (2023). Application and Acceptability of Microbiomes in the Production Process of Nigerian Indigenous Foods: Drive towards Responsible Production and Consumption.
- Pap, N., Beszédes, S., & Pongrácz, E. (2012). *Microwave-Assisted Extraction of Anthocyanins from Black Currant Marc*. Forrás: 10.1007/s11947-012-0964-9
- Rebecca, L., Sharmila, S., Das, M., & Seshiah, C. (2014). *Extraction and purification of carotenoids from vegetables*. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6, 594–598.
- Righi Pessoa da Silva, H. (2018). Ultrasonic-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Food Process Engineering*.
- Righi Pessoa da Silva, H., da Silva, C., & Cervejeira Bolanho, B. (2015). *Ultrasonic-assisted extraction of betalains from red beet (Beta vulgaris L.)*. Forrás: 10.1111/jfpe.12833
- Saladin, K. (2017). *Human Anatomy, 5th Edition*. New York: McGraw Hill Education.
- Saleem, M., Ullah, M., Kamreen, H., Hajri, A., & Alanazi, A. (2024). Microwave-assisted extraction of green tea catechins and antioxidant. *Microchemical Journal*.

- Sawicki, T., Baczek, N., & Wiczowski, W. (2016). *Betalain profile, content and antioxidant capacity of red beetroot dependent on the genotype and root part*. *Journal of Functional Foods* 27: 249-261. Forrás: 10.1016/j.jff.2016.09.004
- Shahidi, F., & Dissanayaka, C. (2023). Phenolic-protein interactions: insight from in-silico analyses – a review. *Food Production Processing and Nutrition* .
- Shaikh, F., Mohsin Ali, T., Mustafa, G., & Abid Hasnain. (2019). Comparative study on effects of citric and lactic acid treatment on morphological, functional, resistant starch fraction and glycemic index of corn and sorghum. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Shih, Y.-H., & Tsai, P.-J. (2021). Assessment of the Antibacterial Mechanism of Pterostilbene against *Bacillus cereus* through Apoptosis-like Cell Death and Evaluation of Its Beneficial Effects on the Gut Microbiota. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
- Slimen, I., Najar, T., & Abderrabba , M. (2017). *Chemical and antioxidant properties of betalains*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 675–689. Forrás: 10.1021/acs.jafc.6b04208
- Székely, E., & Simándi, B. (2014). A szuperkritikus szén-dioxid alkalmazásai. *Magyar Kémiai Folyóirat*, 23.
- Tang, H., Hou, J., Shen, Y., Xu, L., Yang, H., Fang, X., & Bao, X. (2013). *High β - Glucosidase secretion in *Saccharomyces cerevisiae* improves the efficiency of cellulase hydrolysis and ethanol production in simultaneous saccharification and fermentation*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23, 1577–1585. Forrás: 10.4014/jmb.1305.05011
- Tarigopula, G., Chatterjee, S., & Davies, E. (2017). *Pharmacological control of blood sugar*.
- Toepfl, S. (2007). *High intensity pulsed electric fields applied for food preservation*.
- Tormási, J., Benes, E., Matkovits, A., & Abrankó, L. (2024). The impact of sour cherry juice (*Prunus cerasus*) on reducing glucose release during in vitro starch digestion. *LWT*.
- Traditional and innovative approaches for the extraction of bioactive compounds. (2022). *International Journal of Food Properties*.
- Usman, B., Sharma, N., & Satija, S. (2019). Recent Developments in Alpha-Glucosidase Inhibitors for Management of Type-2 Diabetes: An Update.
- Vernon-Carter, E., Alvarez-Ramirez, J., & Bello-Perez, L. (2019). Inhibition of the amylolytic hydrolysis of starch by ethanol.

- Visockis , M., Bobinaitė, R., & Ruzgys, P. (2021). Assessment of plant tissue disintegration degree and its related implications in the pulsed electric field (PEF)–assisted aqueous extraction of betalains from the fresh red beetroot. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*.
- Visvanathan, R., & Houghton, M. J. (2024). Structure-function relationships in (poly)phenol-enzyme binding: Direct. *Food Research International*.
- Vrieze, A., Van Nood, E., Holleman, F., Salojarvi, J., Kootte, R., Bartelsman, J., . . . Oozeer, R. (2012). *Transfer of intestinal microbiota from lean donors increases insulin sensitivity in individuals with metabolic syndrome*. *Gastroenterology*, 143, 913–916. Forrás: 10.1053/j.gastro.2012.06.031
- Wang , Y., Do, T., Mashall, L., & Boesch, C. (2022). *Effect of two-week red beetroot juice consumption on modulation of gut microbiota in healthy human volunteers - A pilot study*. Forrás: 10.1016/j.foodchem.2022.134989
- Wang Sheng, M., & Wang , L. (2017). *A Review of Sublethal Effects of Pulsed Electric Field on Cells in Food Processing*. Forrás: 10.1016/j.jfoodeng.2017.11.035
- Wiczowski, W., Romaszko, E., Szawara-Nowak , D., & Piskula, M. (2018). *The impact of the matrix of red beet products and interindividual variability on betacyanins bioavailability in humans*. *Food Res Int* 108: 530-538. Forrás: 10.1016/j.foodres.2018.04.004
- Wong, J., & Jenkins, D. (2007). Carbohydrate digestibility and Metabolic Effects. *The journal of nutrition*.
- Woolnough, J., & et al. (2010). *The Effect of a Brief Salivary α -Amylase Exposure During Chewing on Subsequent in Vitro Starch Digestion Curve Profiles*. Forrás: 10.3390/ijms11082780
- Xiao, J. (2017). *Dietary flavonoid aglycones and their glycosides: Which show better biological significance?* *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57, 1874–1905. Forrás: 10.1080/10408398.2015.1032400
- Yujie, M., Robinson, J., & Binner, E. (2023). Current status of microwave-assisted extraction of pectin. *Chemical Engineering Journal*.
- Zhang, G., Ao, Z., & Hamaker, B. (2006). Slow digestion property of native cereal starches.
- Zhao, Y., Eweys, A., Zhang, J., Zhu, Y., Bai, J., Darwesh, O., . . . Xiao, X. (2021). *Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components*. *Antioxidants*, 10, 2004. Forrás: 10.3390/antiox10122004

- Zhou, Y., Li, C., & Feng, B. (2019). UPLC-ESI-MS/MS based identification and antioxidant, antibacterial, cytotoxic activities of aqueous extracts from storey onion (*Allium cepa* L. var. *proliferum* Regel). *Food Research International*.
- Zin, M., & Bánvölgyi, S. (2022). *Thermal emerging technology approach for the extraction of bioactive compounds from Cyindra beetroot (peel, flesh, and stalk) with green solvent. Journal of Food Processing and Preservation*, 46(4), e16436. Forrás: 10.1111/jfpp.16436
- Zin, M., & Bánvölgyi S. (2021). *Emerging technology approach for extractibility and stability of betalains from the peel of beetroot (Beta vulgaris L.)*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–11. Forrás: 10.1007/s13399-021-01975-z
- Zin, M., Anucha, C., & Bánvölgyi, S. (2020). *Recovery of phytochemicals via electromagnetic irradiation (microwave-assisted-extraction): Betalain and phenolic compounds in perspective. Food*, 9(7), 918. Forrás: <https://doi.org/10.3390/foods9070918>

8. Ábrajegyzék

<i>1. ábra: Felhasznált eszközök</i>	<i>21</i>
<i>2. ábra: Emésztésszimuláció elrendezése.....</i>	<i>23</i>
<i>3. ábra: Cékla kivonatok betalain tartalma</i>	<i>25</i>
<i>4. ábra: Felszabadult glükóz etanolos cékla kivonat mellett.</i>	<i>27</i>
<i>5. ábra: Felszabadul glükóz desztillált vizes cékla kivonat mellett.....</i>	<i>28</i>
<i>6. ábra: Felszabadult glükóz citromsavas cékla kivonat mellett</i>	<i>29</i>
<i>7. ábra: Cékla kivonatok glükóz felszabadulásának összehasonlítása</i>	<i>30</i>

NYILATKOZAT

Matastik Emma Imola (hallgató Neptun azonosítója: KWBXET) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / **nem javaslom**.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem

Kelt: Budapest, 2024. 10.31.



belső konzulens

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Matastik Emma Imola

A Hallgató Neptun kódja: KWBOXET

A dolgozat címe: Cékla kivonat hatásának vizsgálata fehér kenyér glikémiás tulajdonságára hibrid emésztésszimulációs módszerrel

A megjelenés éve: 2024

A konzulens intézetének neve: Élelmiszertudományi- és Technológiai Intézet

A konzulens tanszékének a neve: Élelmiszerkémia és Analitika Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemitulajdonkezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és - nem titkosított dolgozat a védelmet követően - titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelté után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: 2024. év 10. hó 31. nap


Hallgató aláírása