



Biológiai és anyagtudományi kutatások támogatása képfeldolgozási módszerekkel

Doktori (PhD) értekezés

SZEGHALMY SZILVIA

TÉMAVEZETŐ: DR. ZICHAR MARIANNA

DEBRECENI EGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI DOKTORI TANÁCS
INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
DEBRECEN, 2016.

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Informatikai Tudományok Doktori Iskola *Diszkrét matematika, képfeldolgozás és komputergeometria* programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2016.

.....
Szeghalmy Szilvia

Tanúsítom, hogy Szeghalmy Szilvia doktorjelölt 2008–2011 között a fent megnevezett Doktori Iskola *Diszkrét matematika, képfeldolgozás és komputergeometria* programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2016.

.....
Dr. Zichar Marianna

Orvosi és anyagtudományi kutatások támogatása képfeldolgozási módszerekkel

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében az informatika
tudományágban

Írta: Szeghalmy Szilvia okleveles programtervező matematikus

Készült a Debreceni Egyetem Informatikai Tudományok doktori iskolájának

matematika, képfeldolgozás és komputergeometria programja keretében.

Témavezető: Dr. Zichar Marianna

A doktori szigorlati bizottság:

elnök: Dr. Sztrik János

tagok: Dr. Fazekas Gábor

Dr. Nyúl László

A doktori szigorlat időpontja: 2015.09.01.

Az értekezés bírálói:

.....
.....

A bírálóbizottság:

elnök:

tagok:

.....

.....

.....

Az értekezés védésének időpontja:

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1. Célkitűzések	1
2. Karcolásos üvegvizsgálat számítógépes kiértékelése maradó feszültség jellemzéséhez	3
2.1. Előzmények	5
2.2. Irodalmi áttekintés	6
2.3. Anyag és módszertan	11
2.4. Karcnyom elemzése	13
2.4.1. Alapfogalmak	13
2.4.2. Az algoritmus áttekintése	14
2.4.3. Előfeldolgozás	18
2.4.4. Durva karcnyom meghatározása	19
2.4.5. Körvonal pontosítás	25
2.4.6. A karctű nyomvonalának meghatározása	30
2.4.7. Jellemzőszámítás	30
2.5. Statisztikai elemzés	31
2.6. Eredmények értékelése	33
3. Immunhiszokémiai festéssel kezelt csontvelőmetsetek elemzése	36
3.1. Szövetteni minták	37
3.1.1. Biopsziás mintában megjelenő struktúrák	38
3.2. Irodalmi áttekintés	40
3.3. Automatikus képelemzés	46
3.3.1. A képelemző rendszer áttekintése	47
3.3.2. Előszűrés	48
3.3.3. Csontszerű és izomszerű objektumok detektálása	50
3.3.4. Globális elemző	53
3.3.5. Immunpozitivitás detektálása	55
3.3.6. Sejtmag detektálás	55

3.3.7.	Vérképzőállomány rekonstrukció	57
3.3.8.	Jellemzőszámítás	62
3.3.9.	Elemzés megbízhatóságának jellemzése	63
3.4.	Képfeldolgozó algoritmus kiértékelése	67
3.4.1.	Csontgerendák eltávolítása	67
3.4.2.	Vérképző állomány detektálása	70
4.	Sávós szitakötőszárnyak morfometriai vizsgálatánál alkalmazott bélyegek automatikus meghatározása	72
4.1.	Irodalmi áttekintés	73
4.2.	Felhasznált anyagok	77
4.3.	Automatikus képelemzés	78
4.3.1.	Szárnyak körvonalának meghatározása	78
4.3.2.	Szárnyfolt detektálása hím egyedeknél	80
4.3.3.	Felső szárnytőpont detektálása	82
4.3.4.	Szárnybütyök detektálása	83
4.3.5.	Szárnycsúcs detektálása	83
4.3.6.	Erek detektálása és azonosítása	85
4.3.7.	Álszárnyjegy kiterjedésének mérése nőstény egyedeknél	94
4.3.8.	Jellemzőszámítás	95
4.4.	Képfeldolgozó algoritmus kiértékelése	95
5.	Összefoglalás	101
	Appendices	119

Köszönetnyilvánítás

A **szüleimnek** és a **nagymamámnak**: Köszönöm a türelmet, a belém vetett hitet.

Dr. Fazekas Attilának: Köszönöm, hogy megismerttetted velem a képfeldolgozás világát, és hogy mindig kerítettél új kutatási témát számomra, amikor az előző „pénz, paripa, fegyver” hiányában megszűnt. Sokat jelentettek számomra tanácsaid, és kitűnő csokoládéid, melyekkel megpróbáltál átsegíteni egy-egy reménytelennek tűnő időszakokon.

Dr. Zichar Mariannának: Köszönöm, hogy lehetőség szerint segítetted a tanulmányaimat az eredeti téma megváltozása után is.

Kovács Györgynek: Köszönöm, hogy példát mutattál kitartásból. Valósítsd meg az álmaid! (És szokj le a dohányzásról!)

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm mindazoknak, akikkel együtt dolgozhattam az évek során, különösen **Dr. Bedekovics Juditnak**, **Kuzsella Lászlóné dr. Koncsik Zsuzsannának**, **Szalay Petra Évának** és témavezetőiknek **Marosné dr. Berkes Máriának**, **Dr. Méhes Gábornak** és **Dr. Dévai Györgynek** a közös munka során nyújtott végtelen türelmüket és támogatásukat, valamint **Dr. Barkóczy Péternek**, hogy segítségére még évekkkel a közös munka befejeződése után is számíthattam.



1. Bevezetés

Egy kutatást *objektívnek* és *megbízhatónak* tekintünk, ha a kapott eredmények nem függenek a kutatást végzők személyétől, és a kutatás megismétlése esetén is (közel) azonos eredményt kapunk [66].

Habár mindkét jelző a tudományos kutatás alapvető kritériumaként van számon tartva, az objektivitás elérése több tudományfilozófiai irányzat álláspontja szerint is lehetetlen, hiszen már a kutatás tárgyának kijelölése, a hipotézisek felállítása és az alkalmazott vizsgálati módszerek kiválasztása is függ a kutatást végző személyektől, tehát óhatatlanul szubjektív folyamat [85].

A természettudomány területéhez köthető kutatási gyakorlat viszont inkább a pozitivista szemléletet követi, miszerint megfelelő protokollok és vizsgálati módszerek alkalmazásával objektív, – a modernebb nézetek szerint többé-kevésbé objektív – következtetésre lehet jutni [62]. Az objektivitás és megismételhetőség elérése utáni vágy előtérbe helyezte a kvantitatív megközelítést, maga után vonva az automatikus eljárások iránti igény növekedését is. Napjainkban pedig már teljesen természetesnek számít, hogy a kutatók munkáját különféle hardver eszközök és szoftverek segítik.

1.1. Célkitűzések

A PhD tanulmányaim alatt különböző tudományterületen zajló kutatásokba kapcsolódtam be azzal a céllal, hogy az egyébként időigényes kézi mérések, vagy a szubjektív elemekkel terhelt vizuális vizsgálatok kiváltására képfeldolgozási módszereket adjak.

Az értekezés egy-egy fejezetében konkrétan az alábbi kutatások támogatásához fejlesztett eljárásokról lesz szó:

- Üvegek felületi rétegeiben maradó feszültségek karcvizsgálattal történő jellemzése:

- A képelemzés célja az optikai mikroszkóppal rögzített karcnyomok körvonalának meghatározása és a feszültségállapotok jellemzésére alkalmas paraméterek számítása.
- A β típusú vérlemezke eredetű növekedési faktor receptor expressziójának és a myelofibrosis kapcsolatának vizsgálata:
 - A képelemzés feladata az immunhisztokémiai festéssel kezelt csontvelőbiopsziás minták elemzése, a vérképzőállomány és az immunpozitivitást mutató területek meghatározása, jellemzése.
- Sávos szitakötők taxonómiai revíziója:
 - A képfeldolgozó eljárásnak az alfajok besorolásánál használható külső jegyek automatikus detektálását kellett biztosítani.

2. Karcolásos üvegvizsgálat számítógépes kiértékelése maradó feszültség jellemzéséhez

A mindennapi életben számos olyan tárgy vesz körül bennünket, amely üvegalkatrészeket is tartalmaz. A felhasznált üveg megfelelő minősége a tárgyak élettartama és balesetvédelmi szempontból is lényeges. Az alkatrészek gyártásánál azt is figyelembe kell venni, hogy annak nem csak az üzemszerű használat okozta igénybevételt, de az összeszerelés során fellépő erőhatásokat is ki kell bírnia.

Az üveg gyártására hazánkban az olvasztásos technológia használatos, melynek során az elállításához szükséges alapanyagok (szilícium-dioxid és különféle adalékanyagok) 1500°C feletti hőmérsékleten kerülnek összeolvasztásra, majd a masszát fokozatosan lehűtik a megmunkáláshoz szükséges hőfokra, végül szobahőmérsékletre. A kívülről történő hűtés természetes velejárója a termikus feszültségek fellépése, hiszen a felszíni külső rétegek hamarabb válnak szilárd halmazállapotúvá mint a belső rétegek. A belső rétegekben tömörebb anyagszerkezet alakulna ki, de a már megszilárdult külső réteg gátat szab az összehúzódásnak, ezért a belső rétegben *húzó*, a külső rétegben *nyomó feszültség* alakul ki [58].

Az üvegben kialakuló feszültségek egy része a hűtési folyamat után sem tűnik el, ezeket nevezzük *maradó feszültségeknek*, melyek nagymértékben befolyásolják az üvegtermék minőségét. Míg a maradó húzó feszültség mellett az üveg terhelhetősége kisebb, hajlamosabb szilánkosra törni, a maradó nyomó jellegű feszültség a legtöbb esetben növeli az élettartamot és az ilyen feszültséggel terhelt üveg jobban reagál a mechanikai behatásokra is. Az üvegben maradó nem kívánt feszültségek mértéke alkalmas hőkezelési technológiával a felhasználási célnak megfelelő szintre

csökkenthető [114].

A maradó feszültségek szintjének ellenőrzése általában a gyártási folyamat szerves részét képezi. Széles körben elterjedt az optikai vizsgálat alkalmazása, mely arra épül, hogy az optikailag anizotrop anyagok felületére eső lineárisan polarizált fény kettős törést szenved. Mire az anizotrop anyagból kilépve a két sugár újra interferál egymással, az egyik már fáziskésésben van a másikhoz képest, ez a retardáció pedig polarizskóppal kimutatható [73]. Az üvegminták vizsgálatánál a húzó- ill. nyomófeszültség mértéke a retardáció (R), az üveg vastagsága (d) és az üveg anyagtípusától függő feszültségoptikai állandó (c) ismeretében a

$$\sigma = \frac{R}{dc}$$

képlettel számolható [73].

Az optikai eljárások nem alkalmazhatóak nem-átlátszó (fekete) üvegekre és a „bonyolultabb” geometriával rendelkező üvegek vizsgálata is nehézségbe ütközhet.

A kutatás során a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék, és a Fémtani és Képlékenyalakítási Intézeti Tanszék munkatársaival együttműködve egy olyan módszert dolgoztunk ki, mely a fekete üvegek esetén is képes jellemezni az üveg felületközeli rétegeiben maradó feszültséget, ugyanakkor gyors és teljes mértékben automatizálható és viszonylag olcsó. A vizsgálat kritériuma, hogy a minta felületén egy 6 mm hosszúságú karcvizsgálat elvégezhető legyen, így például egy üvegcső a kialakított módszerrel vizsgálható, hiszen az alkotója mentén karcolható, azonban egy üveggömb már nem.

A kutatásnak a Miskolci Egyetemen dolgozó kollégák részéről már voltak előzményei. Annak érdekében, hogy egyértelmű legyen a saját hozzájárulás mértéke, a dolgozat következő fejezetében ezek az előzmények kerülnek ismertetésre, majd a releváns szakirodalom

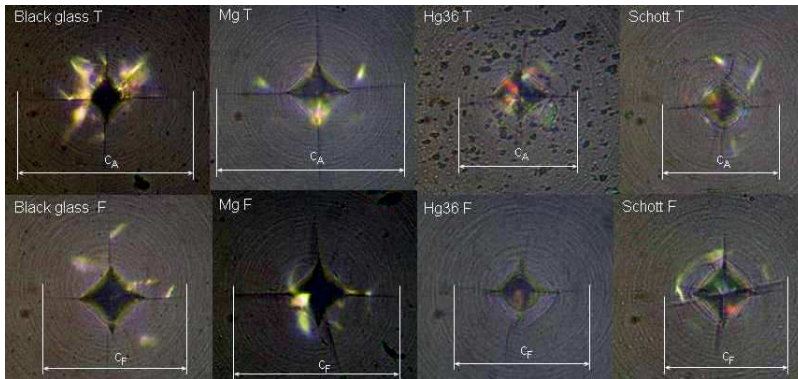
áttekintése következik. Az irodalmi áttekintés után a vizsgálat körülményeit és a felhasznált anyagokat ismertetjük, végül a kialakított eljárás és az elért eredmények következnek.

2.1. Előzmények

A különféle anyagok és bevonatok mechanikai vizsgálatánál a Vickers lenyomatos keménységmérés az egyik legelterjedtebb módszer, melynek során a felületbe szabványos gyémánt gúlát nyomnak meghatározott nyomóerővel. A keménység a lenyomat területe és a nyomóerő hányadosa alapján állapítható meg. A módszer törési szívósság, vagyis az anyag repedésekkel szembeni ellenálló képesség mérésére is alkalmazható, ilyenkor a nyomóerőt oly módon kell beállítani, hogy a lenyomat sarkaiból repedések induljanak ki. A lenyomat alakját és a repedések méretét különböző tényezők befolyásolják [84, 104], a radiális repedések hossza például az anyagban lévő feszültségeket jellemzi.

A Miskolci Egyetemen folyó kutatás első lépése a Vickers lenyomatos keménységmérés és törési szívósság maradó feszültségek mérésének felhasználását tanulmányozták az izzók gyártásánál használt üvegeken (1. ábra). A keménység és az üvegben lévő feszültség között nem találtak egyértelmű összefüggést, azonban a törési szívósság mérésénél feszültségmentes és a feszültséggel terhelt minták közt szignifikáns különbségek voltak a sarkokból kiinduló repedések méretét tekintve [57].

A Vickers lenyomatos törési szívósság teszt hátránya, hogy csak sík üvegeken alkalmazható megbízhatóan, ezért a kutatás a karcolásos vizsgálat irányában folytatódott tovább. A karcnyomokról készült nagyfelbontású felvételek elemzése 2007-ben már képelemző szoftver segítségével történt. A szürkeárnyalatossá alakított, több képkockából álló felvételeken a kontraszt javítása érdekében gamma korrekciót végeztek a szerzők, majd a képkockák közti eltérések



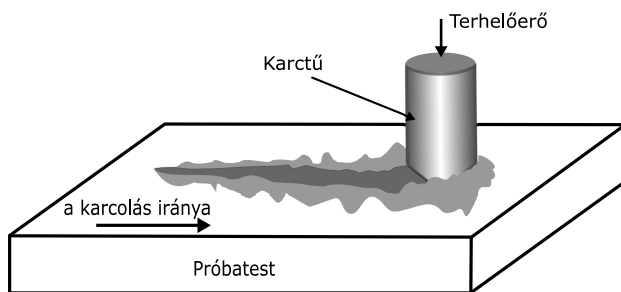
1. ábra. Vickers lenyomat különböző típusú és feszültségi állapotú üvegeken [57]

korrigálására hisztogram kiegyenlítést alkalmaztak. A károsodott terület meghatározása küszöböléssel történt. A cső alakú üvegeknél a teljes képre végrehajtott küszöbölés hamis eredményre vezetett volna a megvilágítás egyenetlensége miatt, ezért a felhasználónak kellett kijelölnie azt a területet, melyen a szoftver dolgozott [69].

Ezen a ponton kapcsolódtunk be a kutatásba azzal a céllal, hogy a digitális képek elemzésére pontosabb eljárást dolgozzunk ki és objektív eszközökkel vizsgáljuk meg a karcnyomot jellemző paraméterek és az üveg feszültségállapota közötti összefüggést.

2.2. Irodalmi áttekintés

A karcvizsgálat során az erre a célra kialakított berendezések szűrőszerszámot nyomnak a vizsgálandó próbatest felületébe állandó vagy folyamatosan növekvő terhelőerővel, miközben a karctű (vagy a próbatest) elmozdul a karcolás irányának és hosszának megfelelően (2. ábra) [106].



2. ábra. Karcvizsgálat sematikus ábrája [106]

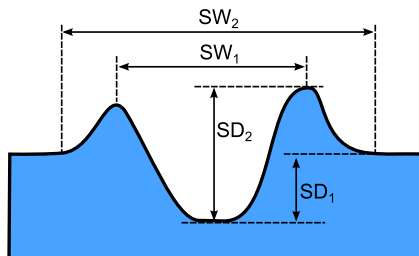
Az anyagtudomány területén alapvető fontosságú az anyagok tulajdonságainak összevethetősége ezért a vizsgálatok elvégzésének módját gyakran szabályozzák standardok. A karcvizsgálattal kapcsolatban ezek a vizsgálat olyan paramétereit rögzítik, mint a nyomóerő, a karcolás sebessége, a minta és karcű mérete stb., definiálják a mérésekhez szükséges olyan alapfogalmakat, mint például a mélység, szélesség vagy a kritikus terhelés.

A karcvizsgálat azonban számos célra használható a hordozófelületek és bevonatok közötti adhéziónak jellemzésétől kezdve az anyag keménységének, deformációs tulajdonságának vizsgálatán át az olyan esztétikai kérdésekig, mint egy karcolás láthatósága. Az alkalmazás célján túlmenően a vizsgált anyagok és bevonatok típusa is befolyásolja a végrehajtás „ideális” paramétereit és a kiértékelés módját, ezért a standardok anyagcsoportok adott tulajdonságainak karcvizsgálattal kapcsolatosan tudnak kialakulni, mint ahogy az a kerámiabevonatok adhéziónak vizsgálata [34, 49] vagy polimer bevonatok karcállóságának vizsgálata [7].

Az üvegfelületek maradófeszültségének jellemzésére még nincs kialakult vizsgálati módszer, ezért a fejezet további részében más anyagokra ill. más célokra használt optikai módszereket tekintetjük át olyan szempontból, hogy az a céljainkra használható-e.

A karcnyom jellemzésére a leggyakrabban használt paraméterek

között van a karcnyom adott helyen mért vagy átlagos szélessége és mélysége [61], melyet a 3. ábrán látható módon mérhetünk.

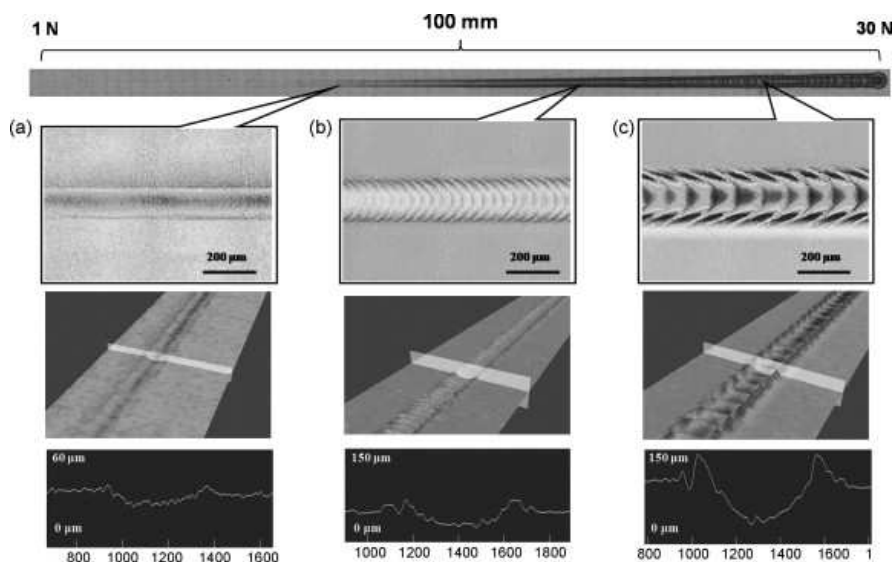


3. ábra. Karcvizsgálat során gyakran használt paraméterek: SW_1 és SW_2 a karcnyom belső és külső szélessége, SD_1 és SD_2 a karcnyom mélysége és a karcnyom felgyűrődéssel együtt mért mélysége [61]

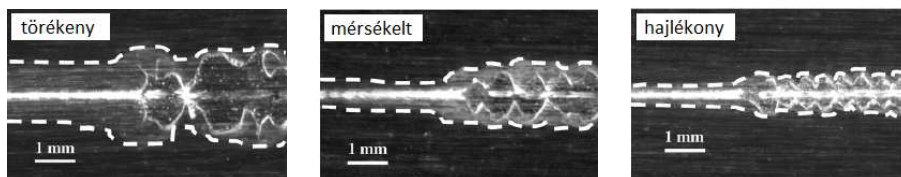
Az átlagos szélesség mérését még a 2005-ös keménységvizsgálatra vonatkozó szabvány szerint is elegendő három(!), a karcnyom hosszúságában egyenletesen elosztott mérési pontban elvégezni, viszont a méréshez használt berendezés felbontásának lehetővé kell tennie a 2%-os hibahatáron belüli mérést [8]. Gyakori a pásztázó elektron mikroszkóp (SEM), a konfokális lézer pásztázó mikroszkóp (CLSM) vagy nanokarcok esetén atomerő mikroszkóp használata [27]. A mélységképet adó módszerek nagy előnye, hogy a karcnyom keresztmetszeti profilján a 3. ábrán látható összes paraméter könnyen meghatározható (4. ábra).

A karc morfológiai elemzéséhez tartozik a különféle típusú repedések, kisebb-nagyobb kitörések vizsgálata is (5. ábra), melyet optikai mikroszkóp segítségével szokás megfigyelni a karc nyomvonalán, illetve annak mentén [17, 18]. Bár a módszer széles körben használatos, automatikus eljárást nem találtunk rá.

A karc láthatóságát célzó kutatások az emberi észlelés irányából közelítenek a károsodás méréséhez, a felület és a karcnyom közötti kontrasztkülönbséget, színbeli eltéréseket [77, 121], vagy fényvisszaverődésben lévő eltéréseket használva [60]. Bár ezen



4. ábra. Három pontban végzett karcvizsgálat CLSM mikroszkóp használatával [53]



5. ábra. Polimer bevonat jellemzése a karcnyom mentén megjelenő kitorések alapján [17]

munkák közt már akad olyan, mely képfeldolgozási algoritmust ad a károsodott terület meghatározására [16], számunkra nem használható, mert a kevésbé látható, halvány kitoréseket nem számítja a károsodott területhez (6. ábra).

A karcvizsgálatot rendkívül gyakran használják bevonatolt anyagok vizsgálatára, ahol általában a bevonat leválását okozó erő mértékének meghatározása a cél. Azonban ezen módszerek sem



6. ábra. Polimer anyag vizsgálata a karc láthatóságának szempontjából [16]. A károsodott területbe (az alsó képen pirossal jelölve) nem számít bele a teljes karcnyom.

hasznosak számunkra, mivel közös vonásuk, hogy valamilyen mérőszám (pl.: súrlódási együttható, a karc keresztmetszeti profiljának átlagos intenzitásértéke) hirtelen változásának detektálására épülnek [105].

A kutatás időszaka alatt optikai- és elektronmikroszkóp (SEM) állt rendelkezésünkre, utóbbi azonban csak vezető és félvezető anyagokon használható előkészítés nélkül. Üvegminták elektronmikroszkópos vizsgálatához a karcolt mintát le kell tisztítani és vékony vezető bevonattal ellátni, ami nem fér össze a teljesen automatikus eljárás kialakításának céljával. Az optikai mikroszkóp mellett szól az alacsony üzemeltetési költség is, bár a feldolgozás szempontjából mind a SEM, mind a CLSM könnyebb utat jelentene [25].

Összességében elmondható, hogy optikai mikroszkóp használata esetén az irodalmi módszerek nem törekednek a karcnyom körvonalának detektálására, de az általánosan elfogadott paraméterek közül a szélesség és a karcnyom hosszának mérése kivitelezhető. A morfológiai elemzés másik módját, a kitérések megfigyelését, a karcnyom körvonalából automatikus módon számolható alakleíró paraméterek vizsgálatával pótoltuk.

2.3. Anyag és módszertan

A kutatás során két különböző típusba tartozó, a villanykörte gyártásához használt, lágy üveg állt rendelkezésre. Az egyik csoportba a kis mennyiségű alkálit tartalmazó magnézia üvegcsövek, a másikba magas alkáli tartalmú, úgynevezett fekete síküvegek tartoztak. A cső alakú próbatestek átmérője 12 mm, hossza 80 mm, falvastagsága 1 mm volt (7. ábra).



7. ábra. Egy cső alakú próbatest a karcvizsgálat után

A fekete üvegekből készült próbatestek 30×40 mm felületű, 4 mm vastagságúak voltak. A próbatestek közt volt feszültségmenetes, ismeretlen feszültségi állapotú, maradó nyomó és maradó húzó feszültséggel terhelt üveg is.

A minták karcolása a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén található egyedi fejlesztésű karcvizsgáló berendezés segítségével, állandó, 40 N-os terheléssel, $5 \text{ mm}/\text{min}$ előtolási sebességgel mellett történt. A karcok hossza 6 mm. A mérőberendezésben, ami a 8. ábrán látható, egy 120° -os szabványos Rockwell gyémántkúp található. Standard hiányában a használt paraméterek (nyomóerő, sebesség, stb.) kísérleti úton kerültek meghatározva.

A maradó húzófeszültséggel terhelt próbatestek a karcolás közben darabokra törtek, így felmerülhet a kérdés, hogy nem lett volna-e szerencsésebb ennek ismeretében csökkenteni a nyomóerőt. A válasz két okból is nem. Egyrészt az üveg törése egyértelműen jelzi, hogy az anyag terhelhetősége nem megfelelő, nincs szükség további vizsgálatra. Másrészt a 40N-os nyomóerő biztosítja, hogy a karcot



8. ábra. A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén lévő, a karcvizsgálathoz használt, egyedi fejlesztésű karcvizsgáló berendezés

repedéseket indíthasson el, kitöréseket okozhasson az üveg felületi rétegeiben, ami azért volt fontos számunkra, mert a Vickers lenyomatos kísérlet éppen a felületi repedések hossza és a felületi feszültség között mutatott ki kapcsolatot.

Az egészben maradt mintákról felvételek készültek egy Carl Zeiss Acio Imager számítógéppel vezérelt léptető tárgyasztalos AxioCamICc1 digitális fényképezőgéppel felszerelt, 5× objektívvel ellátott optikai mikroszkóppal. A teljes felvétel minden karcnyom esetében 4 kisebb képkockából állt össze.

A Miskolci Egyetem a kutatás korai fázisában kb. 10000×2000 felbontású felvételeket bocsátott a rendelkezésünkre, később már a feldolgozáshoz igazodva kb. 4000×1038 -as képek készültek, ahol a pixeldimenzió $1,84 \mu m^2$ volt. A felvételek egy része 8 BPP szűrkeskálás, más részük 24 BPP RGB formátumban érkezett. A képek jó minőségű ($Q=100$) JPG formátumban voltak rögzítve.

A képelemzéshez felhasználható minták anyagminőség alapján hét vizsgálati csoportba sorolhatók. A minták tulajdonságait a 1. táblázat tünteti fel.

1. táblázat. A képelemzésnek is alávetett minták hőkezelési adatai

Csoport jel	Üvegtípus	Állapot ill. hőkezelés	Feszültség-állapot	Karcszám
G1	I. lágy üveg	gyári végtermék	nyomó maradó	29
G2	I. lágy üveg	gyári végtermék	nyomó maradó	24
G3	I. lágy üveg	temperált	feszültségmentes	24
G4	I. lágy üveg	félkész termék	ismeretlen	30
G5	I. lágy üveg	temperált	feszültségmentes	30
G6	II. lágy üveg	temperált	feszültségmentes	30
G7	II. lágy üveg	végtermék	ismeretlen	30

2.4. Karcnyom elemzése

Az eddigiekben a karcnyom, károsodott terület, vagy nyomvonal fogalmakat intuitív módon használtuk, viszont azt is láthattuk, hogy egy-egy fogalom jelentése a vizsgálat céljától függően is változhat, ezért a fejezet első részében a fogalmak általunk használt értelmezése kerül rögzítésre. A fejezet második része a kialakított algoritmus főbb lépéseit és a mögöttes döntéseket hivatott bemutatni, a további részei az általunk kialakított szoftver egyes lépéseinek leírását tartalmazzák.

2.4.1. Alapfogalmak

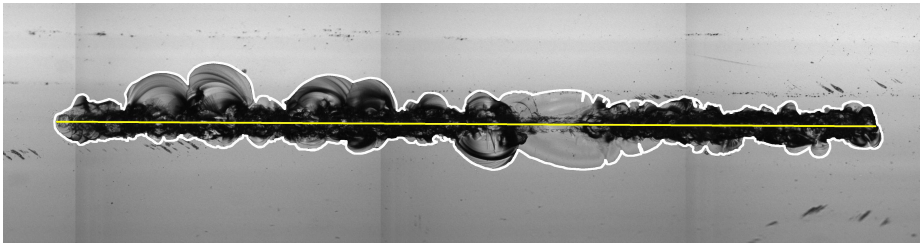
Nyomvonal: A karctű által, a karcvizsgálat során leírt útvonal azon szakasza, melynél a tű az előre meghatározott terhelőerővel nyomódik a próbatest felületébe (9. ábra).

Sérült terület: A próbatest felületén valamilyen mechanikai behatás

folytán fellépő elváltozás.

Másodlagos karcolások: A karcolás során kirepülő szilánkok által okozott sérülések.

Karcnyom vagy *károsodott terület:* A sérült terület azon összefüggő része, mely tartalmazza a nyomvonalat (9. ábra). Tehát a karctű által „felszántott” területet, az abból kiinduló kitöréseket és a mellette megjelenő felgyűrődéseket a karcnyom részének tekintjük, de nem tekintjük a karcnyom részének például a másodlagos karcolásokat vagy egyéb okból keletkezett sérüléseket.



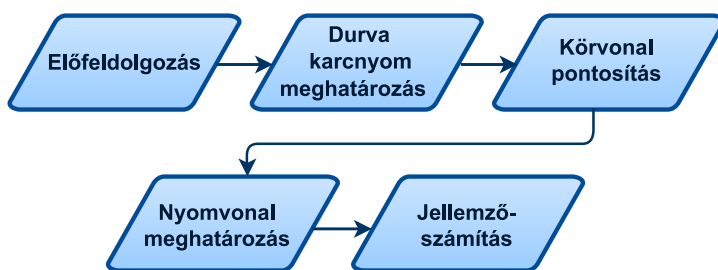
9. ábra. Karcnyom (a körbekerített terület) és nyomvonal (jelölt szakasz)

2.4.2. Az algoritmus áttekintése

Az elemzéshez fejlesztett szoftver főbb lépései a 10. ábrán láthatók. Az előfeldolgozás után a karcnyom durva körvonalát egy lokális élkeresésre épülő, iteratív vágást használó eljárással határozzuk meg, mely a [70] és a [110] publikált munkánk továbbfejlesztett változatának tekinthető. A karcnyom körvonalának pontosítása után a karctű nyomvonalának meghatározása és a vizsgálathoz szükséges jellemzők számítása következik.

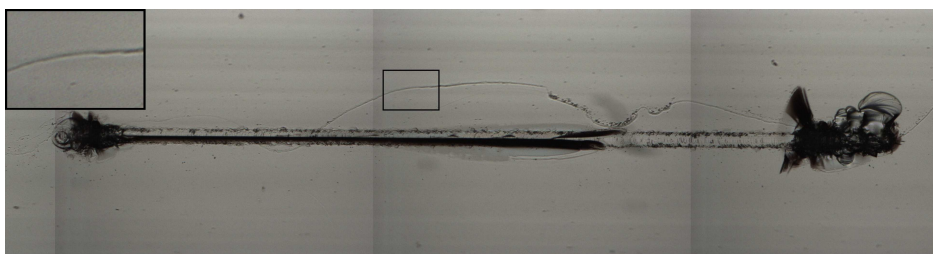
A karcnyom elemzésének leglényegesebb eleme a károsodott terület meghatározása, hiszen ez képezi a jellemzőszámítás alapját.

Az előzményekben ismertetett küszöbölésre épülő módszer [69] azt a fizikai jelenséget használja ki, hogy a sérült, érdessé vált felület



10. ábra. A karcnyom elemzésének főbb lépései

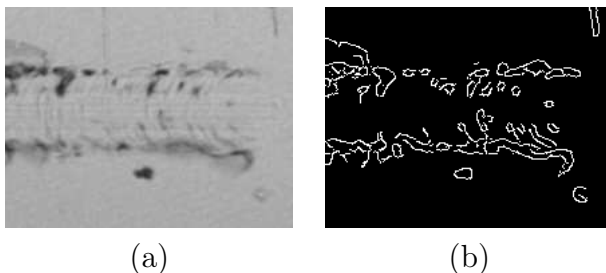
szétszórva veri vissza a rávetődő fényt, melynek eredményeként ez a rész sötétebben jelenik meg a felvételen, mint a minta sértetlen részei. Azonban a lepattanó részek alatt gyakorta sima felszín marad, illetve az is előfordul, hogy az anyag megreped, de nem törik károsodott rész. Ezekon a területeken a visszaverődő fény szöge a döntő a képi megjelenés szempontjából, sokszor csak a károsodott és sértetlen felület közt látható határ utal arra, hogy egy terület a karcnyom része (11. ábra), ezért a kontúrkeresés irányából közelítettük meg a problémát.



11. ábra. A karcnyom és a háttér egyes részei nagyfokú hasonlóságot mutatnak

Ugyanakkor a kontúr detektálása sem triviális feladat, hiszen a károsodott terület inhomogenitása maga után vonja a károsodott és sértetlen felület határának változatos megjelenését is. A határvonal hol éles, hol szinte teljesen eltűnik, az élek helyenként tetőszerűek, máshol lépcsősek vagy rámpaszerűek.

A legtöbb irodalmi kontúrdetektáló valamilyen szinten kezeli a szakadozott körvonal problémáját. Például a klasszikus lokális módszerek, mint a Canny éldetektor [19], vagy annak továbbfejlesztései [29, 82], az élpontok kiemelése után a biztosnak tekinthető élpontokból kiindulva valamilyen hasonlósági kritérium, elsősorban az él erőssége és orientációja, alapján fűzik össze élle a potenciális élpontokat, amivel akár hosszabb szakadásokat is képesek áthidalni a biztos élpontok között. Meg kell azonban említeni, hogy az össze nem tartozó élszakaszokat is hajlamosak összevonni, ha a hasonlóság adott. Az ilyen típusú hibák száma az élprofil hasonlóságának megkövetelésével lenne csökkenthető [125], de az üveg körvonala e tekintetben is inhomogén (12. ábra).



12. ábra. Egy karcnyom kezdeti szakasza (a) és a Canny élkereső kimenete (b). A körvonal szakadozottsága, változatos megjelenése és a karctű által okozott keresztirányú barázdák nehezítik a körvonalkövetést.

A globális módszerek közül az aktív kontúr modelleket éppen azzal a céllal dolgozták ki, hogy a szakadozott, elmosódott élszakaszok ellenére is képesek legyenek folytonos kontúrt szolgáltatni. A Kass és társai által publikált „snake” modell [56] a digitális képtér feletti parametrikus görbeként írja le a kontúrt, mely egy kiinduló állapotból a görbe mozgásáért felelős külső (pl. gradiens, kényszer energiák) és a görbe alakjáért (folytonosság, simaság) felelős belső erők összegeként felírt energiafunkcionál minimalizálásával nyeri el végleges formáját. A kívánt végeredmény elérése érdekében a

kezdeti görbe pontjainak az objektum határának közelében kell elhelyezkedniük, ugyanis a módszer rendkívül érzékeny a kiinduló helyzetre. Az úgynevezett ballon modell az energia függvénybe épített, a görbe növekedését kikényszerítő erő felhasználásával kezeli ezt a kérdést [26], azonban nehéz olyan paraméterezést találni, hogy a kisebb zajokon a görbe áthaladjon, a valódi élek viszont megakasszák azt. A Xu által javasolt gradiens vektor áramlás külső erőként való felhasználása [124] szintén csökkenti a kiinduló helyzetre való érzékenységet és a konkáv alakzatoknál is jól használható.

A parametrikus aktív kontúrok másik hátránya, hogy nem kezelik automatikus módon a topológiai változásokat [20]. A karc körvonalának keresésénél ez azért jelent problémát, mert másodlagos karcok, főleg közvetlenül a karcnyom melletti részeken, hasonló mértékben ütnek el az üvegfelület sértetlen részeitől, mint maga a karcnyom, így ha az aktív kontúr inicializálásánál másodlagos karcok tapadnak rá a kontúrra, kevés esély mutatkozik arra, hogy a görbe végül a megfelelő helyre tapadjon.

Az implicit görbeleírást használó, geometriai vagy nem parametrikus aktív kontúrok, mint például a Level Set [79] megoldást nyújtanak az inicializálás problémájára és a topológiai változásokat is képesek kezelni. A számítási igényük viszont jelentős és a zajra is érzékenyebbek nem parametrikus társaiknál [20, 22]. Használatukra vonatkozó kísérleteink azt mutatták, hogy a karcnyom inhomogén volta miatt nehéz olyan erőt találni, mely éppen a megfelelő körvonalnál képes megállítani a frontvonalat.

Más szerzők a gráfelmélet oldaláról közelítik a szegmentálás kérdését, súlyozott, irányítatlan gráfok particionálásával kapcsolatos elméleteket ültetve át a képfeldolgozás világába [37, 96, 90]. A gráf csúcspontjai a képpontoknak (szegmensek) felelnek meg, az élek a képpontok közti szomszédsági viszonyt hivatottak reprezentálni. Az élek súlya az általuk összekötött csúcsoknak megfelelő pixelek közti

eltérést írja le. A vágást használó módszerek valamilyen költségfüggvény mellett értendő minimális súlyú vágás mentén osztják fel a gráfot [96, 90], számítási idejük azonban jelentős. Gyorsabban szolgáltatnak eredményt a Zahn [126] által publikált elvet követő szegmentálók, melyek a minimális feszítőfa (MST) mentén particionálják a gráfot, ugyanis az MST mohó algoritmussal közel lineáris időben felépíthető [24]. Az egyik legismertebb ilyen módszer Felzenszwalb és Huttenlocher (F&H) [37] összevonás alapú eljárása, ahol a szegmensek összevonását végző kritérium, az MST-ben szereplő legnagyobb súlyú élhez igazodik.

Számunkra ez az eljárás azért előnyös, mert az élek súlyozásának megváltoztatásával, és a túlszegmentálást támogató paraméterezéssel befolyásolhatjuk úgy a működését, hogy a halvány kitörések se olvadjanak egybe a háttérrel. Szintén előnyös az adaptív tulajdonsága, hiszen a képkockák megvilágítása sem teljesen egyenletes.

A túlszegmentálás után gyakori a szegmensek intenzitásérték vagy egyéb textúrainformáció alapján való osztályba sorolása, de amint az a 11. ábrán is látható, a karcnyom régióinak egy része a sértetlen felülethez sokkal inkább hasonlatos, mint a karcnyom más részeihez, ezért F&H módszerét nem magában használtuk fel, hanem egy előzetes szegmentálás pontosítására.

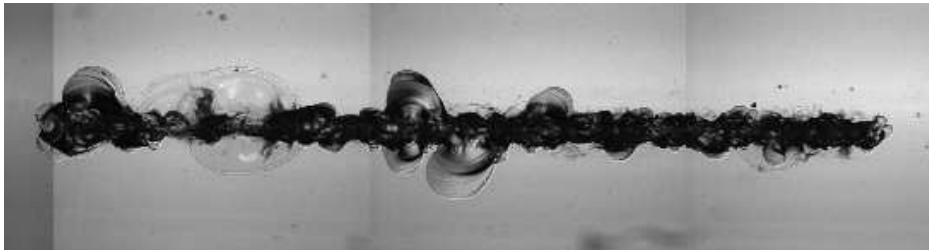
2.4.3. Előfeldolgozás

A karcelemzés megkezdése előtt a 24 bites RGB képeket 8 bites, szürkeárnyalatos képpé transzformáltuk, ugyanis a kromatikus információnak nincs jelentősége a karcnyom detektálásánál, inkább zavaró a prizma-szerűen viselkedő kitörések miatt, melyek színeire bontják a fényt. Az átalakítást a közismert

$$Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$$

képlettel hajtottuk végre [5], ahol Y az eredményképet, az R , G , B az eredeti kép piros, zöld és kék csatornáját jelöli.

A számítási igény csökkentése érdekében a felvételeket átméreteztük, melyre a legközelebbi szomszéd interpolációs módszert használtuk az élek elmosódásának elkerülése érdekében. A kicsinyített kép szélessége és magassága az 1. körben érkezett felvételeknél az eredeti felvételek nyolcada, a 2. körben érkezett felvételeknél az eredeti negyede. Általános zajszűrésként 3×3 -as Gauss szűrőt használtunk $\sigma = 1.0$ paraméterrel [95]. A paraméter választásnál az élek megőrzésére helyeztük a hangsúlyt (13. ábra).



13. ábra. Egy karcról készült felvétel az előfeldolgozás után

2.4.4. Durva karcnyom meghatározása

A lépés célja, egy olyan maszk meghatározása, mely teljes mértékben magában foglalja a karcnyomot és körvonala lehetőség szerint közel helyezkedik el a karcnyom valódi körvonalához.

Ahogy korábban már említésre került, a karc körvonalának változatos megjelenése nem kedvez a lokális kontúrkövető eljárások használatának, azonban ha a pontos körvonal meghatározás nem elvárás a közeli élpontokat morfológiai műveletek használatával össze lehet „olvasztani”.

Mivel ebben a fázisban a kontúrt csak közelítőleg kívánjuk meghatározni, az éldetektorral szemben nem támasztottunk nagy elvárásokat, elsősorban a számítási igény alapján választottunk. A hasonló komplexitású operátorok közül azért esett a választásunk az első parciális deriváltakon alapuló Sobel gradiens-operátorra [100], mert kevésbé zajérzékeny, mint a szintén elsőrendű Prewitt vagy Roberts operátor [101]. A nem vegyes parciális deriváltakból építkező Laplace operátor pedig kimondottan érzékeny a zajokra. A karcnyom élpontjainak meghatározásánál a Sobel operátor átlós élekre való érzékenysége is előnyös.

A gradiens erősségét a számítási igény csökkentése érdekében a

$$G \approx |I * G_x| + |I * G_y|$$

képlet alapján közelítettük, ahol I az eredeti kép, a $*$ a konvolúció jele, a G_x ill. G_y pedig az alábbi, parciális deriváltak közelítésére szolgáló kernelpár:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}.$$

A valódi élpontok és a zaj elkülönítésére tipikus az élerősség szerinti vágás alkalmazása, ugyanakkor a helyes vágási határ meghatározása problémás terület, hiszen az élerősség függvény eloszlása tipikusan egymódusú, a valódi és a fals élek osztálya élerősséget tekintve átfedő [87]. Az optimális küszöbérték automatikus meghatározására több megközelítés is létezik. A hisztogram alakjára építő módszerek leginkább a csúcsok és völgypontok, vagy a görbe hirtelen változása alapján határozzák meg a határt. Más megoldások a-priori ismeretekre támaszkodnak, mint például az él és nem élpontok aránya a képen. Viszonylag robusztus módszernek számítanak a vágási szintet „próba-hiba” alapon, a különböző küszöbértékek mellett binarizált képek eredeti képpel való hasonlósága, élek

egybeesése alapján kiválasztó küszöbölők. A felsorolást hosszasan folytathatnánk, azonban hely hiányában ettől eltekintünk, a téma iránt mélyebben érdeklődő olvasók számára Sezgin és Sankur kitűnő összefoglaló munkáját ajánlva [94].

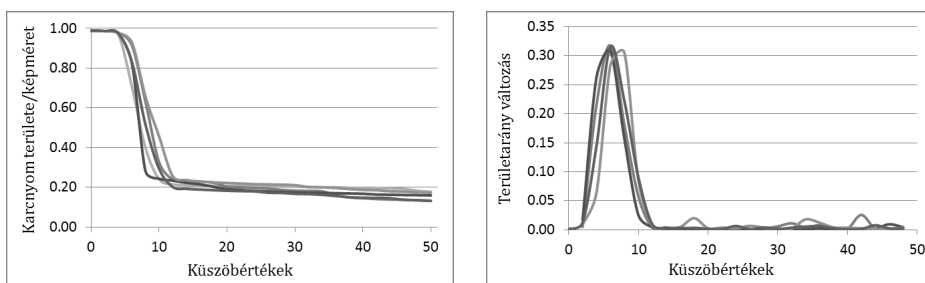
A megfelelő végeredmény eléréséhez fontos, hogy ezen a ponton minél kevesebb valódi élt veszítsünk, ezért a minták egy részén, 50 erre a célra elkülönített képen fokozatosan növekvő határral vágásokat végeztünk. Meghatároztuk a legkisebb küszöbértéket, ahol a binarizált képen a karc körvonala és a háttér már elkülönül egymástól, vizsgáltuk hogyan változik a karcnyom területe és a zajszint a legnagyobb területű objektumot (üreges területét is beleértve) karcnyomnak tekintve és hogyan változik a zajszint. *Zajszint* alatt, itt, a kép feltételezett karcnyomon kívüli előtérpontjainak és a kép karcnyomon kívül eső összes pontjának arányát értjük.

A mérések azt mutatták, hogy a Sobel operátor alkalmazása után a keresett küszöbértékek 9 és 25 közt szóródnak. A karcnyom területe tipikusan a 14. ábrán látható módon változott. A küszöbérték növelése előbb hirtelen csökkenést okoz, amit stagnálás, kismértékű csökkenés követ. A szűk vágási tartomány kedvezett egy iteratív módszer fejlesztésének. A leállási feltétel a zajszint és a karcnyom területváltozása alapján került meghatározásra (lásd 1. algoritmus, 15. ábra).

Az algoritmus legtöbb lépése nem igényel különösebb magyarázatot, a kétszintre vágást a jól ismert

$$I_1 = \begin{cases} 1, & \text{ha } G > th \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}$$

képlet alapján valósítottuk meg [101], a legnagyobb komponenst a külső kontúrok által körbezárt terület mérete alapján választottuk ki, az üregeket is beleértve. Egyedül az *illesztesEltavolitas* függvény szorul részletesebb magyarázatra.



(a)

(b)

14. ábra. Néhány példa a feltételezett karcnyom (legnagyobb objektum) területének alakulására különböző küszöbszintek mellett: (a) karcnyomterülete a képméret arányában, (b) a területarány változás

Illesztés eltávolítása

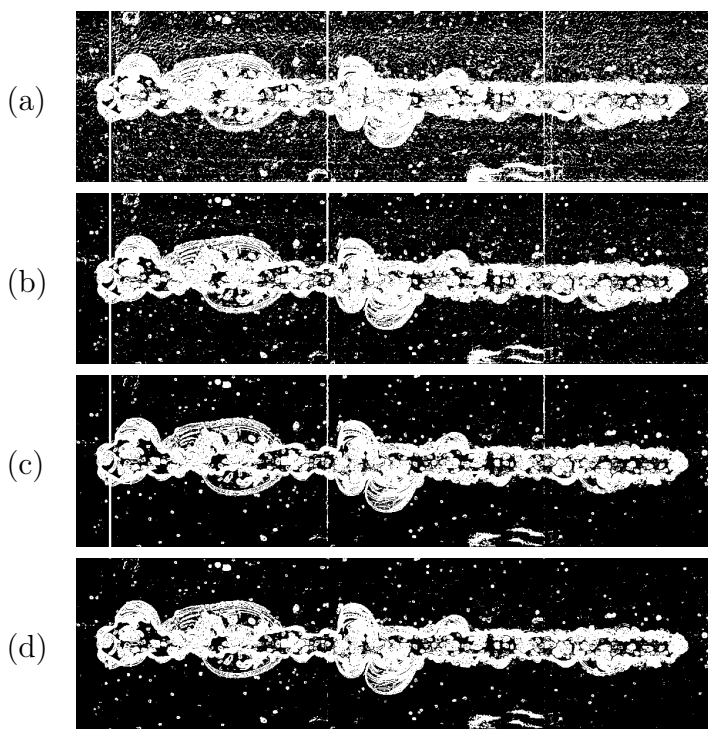
A korábbi lépések során nem foglalkoztunk a felvételt felépítő képkockák közti különbségek csökkentésével, ugyanis nem ismerjük a képkockák közti határok pozícióját. Az éldetektálás viszont kiemeli az illesztések helyét, ami összekapcsolhatja a karcnyomot egyéb zaj objektumokkal, befolyásolva ezzel a vágási határ megállapítását is. A képkockák illesztésénél éles határvonal található, ezért a 3×3 -as Sobel operátor alkalmazása után elméletileg 2-3 pixel széles függőleges vonalak keletkezése várható. A kezdeti Gauss szűrés és a vonalra rakódó zajok miatt azonban ennél szélesebb vonalak megjelenésével is számolni kell. Az illesztési helyek meghatározásához minden oszlopra nézve meghatároztuk azon előtér pontok számát, melytől balra illetve jobbra 4 pixelnyi távolságra már nem található előtérpont. Majd a három legnagyobb darabszámmal rendelkező oszlopnál, – az egymás melletti oszlopok választását nem engedélyezve – töröltük ezeket pontokat a bal és jobb oldali szomszédjaikkal együtt. Az illesztések egy részénél szinte tökéletes az átmenet, ezért a gyakorlatban szükség volt egy minimális határ bevezetésére a darabszámra vonatkozóan. A határt 20 pixelben határoztuk meg a küszöbérték megadásához is használt

1. algoritmus. A küszöbérték megállapításához fejlesztett iteratív algoritmus

Data: G : gradiens kép, mérete: $H \times W$
 n_0 : elfogadható zajszint felső határa
 T_0 : minimális terület változás a képméret arányában
(tesztek alapján 0.01)
 Δ_m : maximális lépésköz a küszöb emelésénél
(tesztek alapján 5)
 th_{min} : minimális küszöbérték (tesztek alapján 10)
 th_{max} : maximális küszöbérték (tesztek alapján 25)
Result: c : feltételezett karcnyom

```
th ← thmin
Tc ← W * H
do
  Tpre ← Tc
  I1 ← vagas(G, th)
  I2 ← illesztesEltavolitas(I1)
  c ← legnagyobbKomponens(I2)
  TI2 ← |{p | I2(p) = 1}| // az I2 kép előtérponjainak száma
  Tc ← |c| // komponens pontjaink száma
  n ←  $\frac{T_{I2} - T_c}{W \cdot H - T_c}$ 
  /* ha túlzottan nagy az objektum */
  if ( $\frac{T_c}{W \cdot H} > 0.5$ ) then
    | n ← 1
  end
  /* ha túlzottan sok a zaj */
  if n > n0 then
    | th ← th + min( $\frac{2n}{n_0}$ , Δm)
  end
while (n > n0 and  $\frac{T_{pre} - T_c}{W \cdot H} > T_0$  and th < thmax)
```

tesztképekre gyakorolt hatást alapul véve (15.d ábra).



15. ábra. Az iteratív küszöbölés közbenső lépései (a–c) és az (c) képre alkalmazott illesztés eltávolítás eredménye (d)

Kiterjesztés

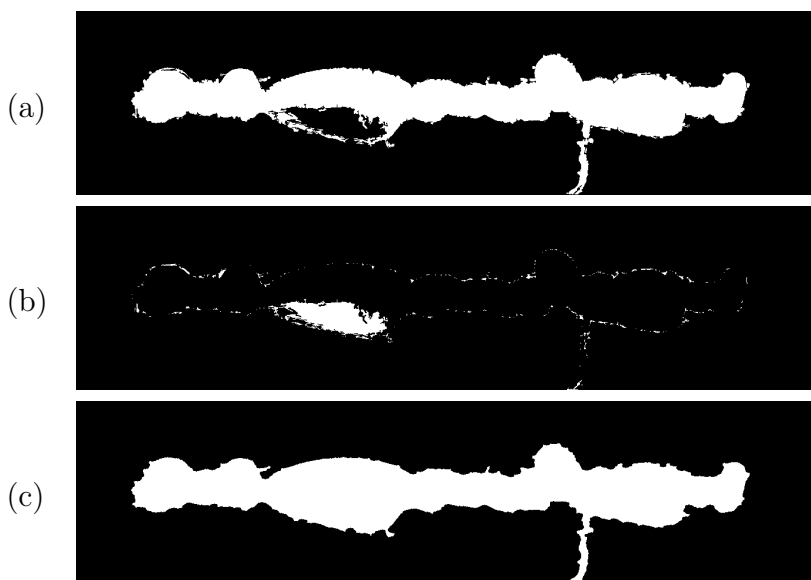
A durva karcnyom meghatározásának utolsó lépése a vágás által esetlegesen megszakított objektumrészek összekapcsolása. A c karcnyom kiterjesztett változatát a

$$c_{ext} = (\gamma((c \oplus S))) \ominus S$$

képlet adja meg, ahol S egy (11×7) -es ellipszis alakú struktúraelem, γ pedig a lyukfeltöltés műveletét jelöli. A struktúraelem elnyúlt alakja, a vízszintes irányú éleknél keletkezett szakadások megszüntetésének kedvez. A lyukfeltöltést technikailag a háttérre

alkalmazott területelárasztó [2] eljárással oldottuk meg. A folyamat végén az elárasztott területeket tekintjük háttérnek és minden más képpontot előtérnek.

Az újonnan megjelenő részek, vagyis a $c_{ext} \cap \bar{c}$ összefüggő komponensei, akkor válnak a c karcnyom részévé, ha több előtérponttal szomszédosak, mint ahány háttérponttal (16. ábra). A \bar{c} a képpontok alkotta halmaz és a c halmaz különbségét jelöli.



16. ábra. Megszakadt körvonalak, karcnyomhoz tartozó egyéb részek pótlása: (a) a feltételezett karcnyom, (b) valószínűsített karcrészeklettek ($c_{ext} \cap \bar{c}$), (c) a karcnyom durva maszkja

2.4.5. Körvonal pontosítás

A durva karcnyom körvonala és a valós körvonal akár a vágásnál keletkezett hibák miatt, akár az előző lépésben alkalmazott morfológiai műveletek hatására eltérhet egymástól, ezért az előző

lépésben meghatározott körvonal mellett egy keskeny sávban szegmentáljuk a képet és határvonalat a szegmensek határaihoz igazítjuk.

A sáv kialakításához morfológiai dilatációt és eróziót alkalmaztunk a durva karcnyomra (c):

$$H = (c \oplus B_1) \setminus (c \ominus B_2),$$

ahol B_1 egy kör alakú szerkesztőelem, esetünkben 21×21 -es. Az erodálás mértékét úgy érdemes beállítani, hogy az ne tudja megszakítani a karcnyomot, de a másodlagos karcolások eltávolítására alkalmas legyen. A méret felülről becsülhető a kitörések nélküli karcnyom szélességének, (a szűrőszerszám felületbe nyomódó részének maximális szélessége) ismeretében. A paraméter beállításánál érdemes figyelembe venni, hogy a tú különböző keménységű üvegeknél eltérő mélységben nyomódhat a felületbe.

A dilatáció során elegendő annyit biztosítani, hogy a körvonal mentén egy olyan sáv alakuljon ki, mely háttérpontokat is tartalmaz, ezért elegendő kisebb, pl. 15×15 -ös kör alakú struktúraelemet alkalmazni, és ezt a szegmentálás idejének csökkentése érdekében ki is használtuk. A H sávon belül eső pontok képezték a szegmentáláshoz használt gráf csúcspontjainak halmazát. Éleket azon csúcsok közt vettünk fel, melyek egymással 8-szomszédság szerinti viszonyban álló pixeleket reprezentálnak.

A szegmentálást az eredeti Felzenszwalb-Huttenhotter [37] eljárása szerint végeztük el, mely lényegében Kruskal minimális súlyú feszítőfa felépítésére szolgáló algoritmusának kiegészítése úgy, hogy az szegmensek összevonása csak bizonyos feltétel teljese esetén menjen végbe (2. algoritmus). A kiegészítő feltétel szerint a két szomszédos komponens (A , B) csak akkor kerül összevonásra, ha az összevonás legfeljebb kismértékben növeli a szegmensek inhomogenitását. Az *inhomogenitást* az alábbi képlet szerint

definiálva egy S szegmensre

$$\mathcal{W}(S) = \max_{e \in MST(S)} (w(e)),$$

ahol $MST(S)$ az S minimális súlyú feszítőfáját, $w(e)$ az e él súlyát jelöli, az összevonás kritériuma a

$$\mathcal{W}(A \cup B) < \min \left(\mathcal{W}(A) + \frac{r}{|A|}, \mathcal{W}(B) + \frac{r}{|B|} \right) \quad (1)$$

képlettel írható fel, ahol r egy összevonás szabályozására szolgáló paraméter, melynek hatása a komponens méretének növelésével egyre inkább csökken. Mivel az algoritmus mohó módon építi a minimális súlyú feszítőfákat, mindig a soron következő minimális súlyú él által összekötött komponensek összevonhatóságát vizsgálva, ezért ha egy még nem feldolgozott e él nem szerepel az általa összekötött, A és B komponensek feszítőfájának egyikébe sem, akkor

$$w(e) \geq \mathcal{W}(A) \text{ és } w(e) \geq \mathcal{W}(B)$$

is teljesül, így az (1) kiegészítő feltétel a

$$w(e) < \min \left(\mathcal{W}(A) + \frac{r}{|A|}, \mathcal{W}(B) + \frac{r}{|B|} \right)$$

alakba írható át.

Annak érdekében, hogy a képen szereplő halványabb élek is megakadályozhassák két szomszédos szegmens összevonását minden olyan gráfbeli él súlyát, melynek az egyik és csak az végpontja sötétebb a lokális környezetében szereplő pixeleknél, megnöveltük az r (összevonást szabályzó paraméter) értékével. A lépés hatására ezek a pixelek kimaradnak a kezdeti összevonásból és várhatóan csak más élpontokkal kerülnek egy szegmensbe. A gráf éleinek súlyát a következő képlet alapján számoltuk

$$w(e(v_p, v_q)) = |I(p) - I(q)| + |A(p) - A(q)|,$$

2. algoritmus. Felzenszwalb-Huttenlotter szegmentálás [37]

Data: $G(V, E)$: a szegmentálandó kép gráfrepresentációja

$V = \{v_1, \dots, v_n\}$: a csúcsok halmaza

E az élek halmaza

r : összevonást szabályzó paraméter

Result: $S = \{S_0, \dots, S_k\}$: a szegmensek halmaza

$S \leftarrow \{S_1, \dots, S_n\}$, ahol S_i a v_i -t tartalmazó egy elemű szegmens
($i = 1, \dots, n$).

/* végig a súly szerint növekvőleg rendezett éleken ($\gamma(E)$) */

for each $e(v_i, v_j) \in \gamma(E)$ **do**

$A \leftarrow \text{szegmens}(v_i)$ // melyik S-beli szegmens megfelelője

$B \leftarrow \text{szegmens}(v_j)$ // melyik S-beli szegmens megfelelője

if $A \neq B$ and $w(e) < \min\left(\mathcal{W}(A) + \frac{r}{|A|}, \mathcal{W}(B) + \frac{r}{|B|}\right)$ **then**

 | összevon(A, B) // két S-beli szegmensek összevonása

end

end

ahol I az előfeldolgozás után nyert kép, v_p a kép p pontját reprezentáló csúcspontot, az $e(v_p, v_q)$ a v_p és v_q közti élt jelöli. Az A az I kép adaptív vágásával áll elő az alábbi módon:

$$A(p) = \begin{cases} r, & I(p) < \frac{1}{N \times N} \sum_{q \in W_p} I(q) - k \\ 0, & \text{egyébként.} \end{cases}$$

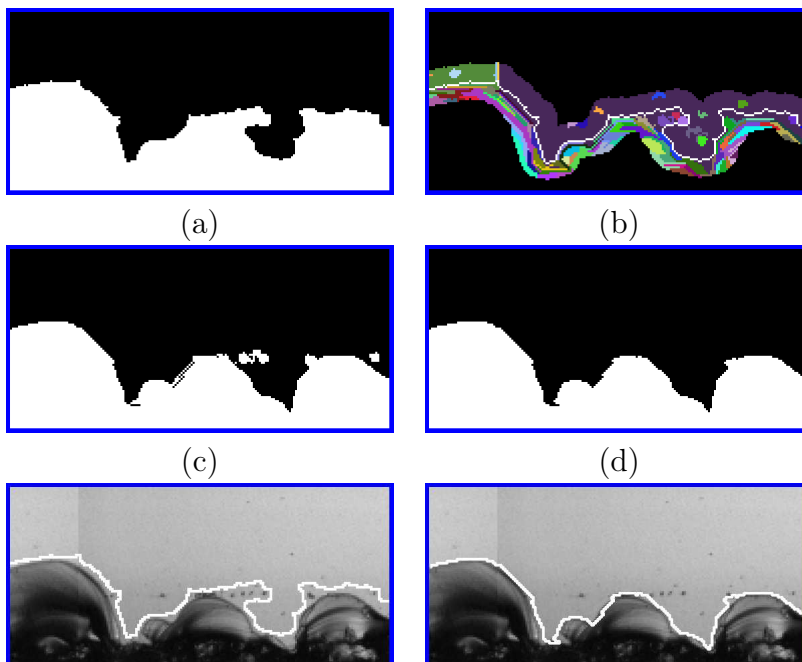
A képletben a W_p egy p középpontú $N \times N$ méretű ablakot jelöl. A k a vágás érzékenységet szabályzó konstans. Az alkalmazásban k értékét 5-nek, N -ét értékét 7-nek választottuk, mert ez a méret már elég nagy ahhoz, hogy a pontszerű zajokra ne legyen érzékeny a vágás és elég kicsi ahhoz, hogy a megvilágítás képkockán belüli egyenetlenségei ne befolyásolják a végeredményt.

A durva karcnyomból eltávolításra kerültek azon szegmensek, melyek

összeolvadtak valamely háttérszegessel, formálisabban:

$$c = c \setminus \{S_i \in S \mid S_i \cap \bar{c} \neq \emptyset\}.$$

A lépés hatására a háttérhez tartozó nagyobb szegmensek kisebb objektumokat, nyúlványokat hagyhatnak még hátra, ezért a karcnyom kialakításához még egy morfológiai nyitást hajtottunk végre egy 9×9 méretű, kör alakú struktúraelemmel (17. ábra).



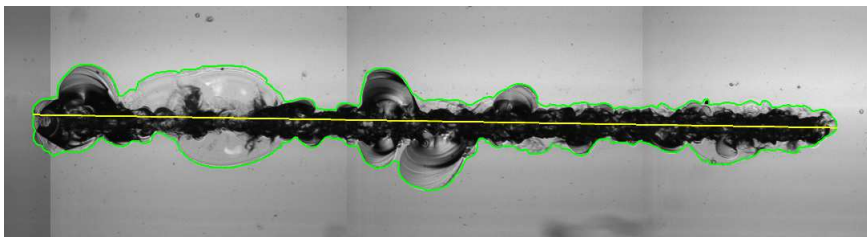
17. ábra. Körvonal igazítása szegmentálás használatával: (a) a durva karcnyom körvonala (fehérrel), (b) a szegmentált terület (az azonos szín azonos szegmenseket jelöl, fehérrel a durva karcnyom körvonala látható), (c) kilógó szegmensek eltávolítása utáni maszk, (d) a karcnyom végleges maszkja

Az előfeldolgozás folyamán a képet átméreteztük, ezért a végleges körvonal meghatározásához a karcnyom körvonalát az eredeti

képméretnek megfelelően felnagyítjuk és a pontokra B-spline-t illesztettünk.

2.4.6. A karctű nyomvonalának meghatározása

A karc nyomvonalát közelítőleg tudjuk meghatározni. Jelentősége csak azon kevés mintánál van, ahol a nyomvonal és a kép x-tengelye jelentős eltérést mutat. Az előző lépésben meghatározott karcnyomot a kép x-tengelye mentén három egyenlő részre osztottuk fel, majd az első és a harmadik harmadban meghatároztuk a karcnyom legkeskenyebb részét. A legkeskenyebb pontokban az alsó és a felső görbét összekötő szakasz felezőpontján áthaladó egyenes azon szakaszát tekintettük a karc nyomvonalának, mely az objektumon belül halad (18. ábra).



18. ábra. A program által meghatározott körvonal és nyomvonal

2.4.7. Jellemzőszámítás

Ebben a fejezetben a feszültségállapot és a karcnyom morfológiája közötti összefüggés feltárásánál vizsgált jellemzők kerülnek bemutatásra. A jellemzőszámítás előtt a karcnyomot elforgattuk úgy, hogy a nyomvonal a kép x-tengelyével párhuzamos legyen. A vizsgált jellemzők többsége a képfeldolgozás területéről ismert alakleíró, más részük az anyagtudomány területéről származik. A paramétereket a 3. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. Karcleírás során használt jelölések

Jelölés	Leírás, képlet
$ \cdot $	abszolút érték jele
$\ \cdot\ $	(euklideszi) vektornorma
c	a karcnyom pontjai
$h(i)$	a kontúr pontjai az óramutató járásával egyező bejárásnál ($i \in \{0, \dots, m\}$)
$f(x)$, $g(x)$	a legfelső ill. legalsó karcnyompont y koordinátája a karcnyom x koordinátájánál ($x \in \{0, \dots, n - 1\}$)
$W(x)$	karcnyom szélessége az x koordinátánál helyen: $f(x) - g(x)$ ($x \in \{0, \dots, n - 1\}$)

2.5. Statisztikai elemzés

A statisztikai vizsgálat során arra a kérdésre kerestük a választ, hogy a karcnyom különféle tulajdonságai, konkrétan a 1. táblázatban szereplő paraméterek, függenek-e a az anyag feszültségállapotától. A kérdés megválaszolásához az ismert feszültségállapotú minták által alkotott két csoportot (4. táblázat) egyszempontú szórásanalízissel (One-way ANOVA) hasonlítottuk össze, ami lehetővé teszi, hogy később esetlegesen több csoport mellett (pl. húzófeszültségű minták jelenlétében) is megismételhető legyen a vizsgálat. Az adatok torzulásának megelőzése érdekében néhány anyaghibát tartalmazó és szennyeződéssel terhelt mintát a statisztikai vizsgálatból kizártunk.

A szórásanalízis előfeltétele a változók közel normális eloszlása, melyet Shapiro-Wilk teszttel ellenőriztünk csoportonként. A 1. táblázatban szereplő paraméterek közül 0,05-ös szignifikanciaszint mellett normális eloszlásúnak tekinthető a W_{avg} , W_{med} , A , D_{avg} , S_{comp} , A_{hull} , P_{hull} , S_{ecd} , P , és az A_{norm} (Függelék 13. tábla). A szórásanalízis végrehajtásának további követelménye a csoportok szórásának homogenitása, mely a Levene-teszt alapján ($\alpha = 0,05$) minden normális eloszlású paraméterre teljesült (Függelék

3. táblázat. A vizsgált paraméterek. Az itt nem definiált jelölések leírását a 2. táblázat tartalmazza.

Paraméter	Leírás, képlet
L	a nyomvonal hossza
A	a karcnyom területe: $ c $
A_{norm}	a karcnyom hosszegységre vonatkozó fajlagos területe: $\frac{A}{L}$
P	a kontúr hossza: $\sum_{i=0}^{m-1} h(i) - h((i+1) \bmod m) $
Δy	csipkézettség: $\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} f(i) - f(i-1) + g(i) - g(i-1) $
W_{avg}	a karcnyom átlagos szélessége: $\frac{1}{n} \sum_{x=0}^{n-1} W(x)$
W_{std}	a karcnyom mentén mért szélességértékek szórása: $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=0}^{n-1} (W(x) - W_{avg})^2}$
W_{med}	a karcnyom mentén mért szélességértékek mediánja
W_{min}	a karc szélessége a legkeskenyebb pontban: $\min_{x \in \{0, \dots, n-1\}} W(x)$
W_{max}	a karc szélessége a legszélesebb pontban: $\max_{x \in \{0, \dots, n-1\}} W(x)$
D_{avg}	körvonalpontok súlypontjától mért átlagos távolsága: $\frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} h(i) - \frac{1}{ c } \sum_{p \in c} p $
S_{circ}	körszerűség: $\frac{4\pi A}{P^2}$
S_{rect}	minimális területű befoglaló téglalap hosszú és rövid oldalainak aránya
S_{comp}	kompaktság: $\sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} / (\max_{i,j \in \{0, \dots, m-1\}} h(i) - h(j))$
A_{hull}	konvex burok területe
P_{hull}	konvex burok kerülte
S_{conv}	konvexitás: $\frac{P_{hull}}{P}$
S_{ecd}	ekvivalens területű kör átmérője: $2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$

14. tábla). A kritériumoknak eleget tevő változókra végrehajtva a szórásanalízist megállapítható, hogy $\alpha = 0,05$ szint mellett a csoporton belüli és a csoportok közötti szórás minden változó esetén jelentősen különbözik, a feszültségmentes és a nyomó

4. táblázat. A statisztikai vizsgálatnál használt csoportok

Vizsgálati csoportok	Anyagcsoportok (2.3. fejezet)	Mintaszám
feszültségmentes	$G1, G2$	52
nyomófeszültségű	$G3, G5, G6$	80

maradófeszültséggel terhelt csoportokban a paraméterek átlagértéke szignifikánsan eltér. Az állítás erősebb, $\alpha = 0,01$ szint mellett is fenn áll (Függelék 15. tábla). Az elemzések elvégzéséhez SPSS-t használtunk [102].

2.6. Eredmények értékelése

A képfeldolgozó rész megbízhatóságának méréséhez az algoritmus által meghatározott karcnyomot kézi annotációval vetettük össze 50 olyan képen (kb. 4000×1038), melyeket a paraméterek beállításához nem használtunk fel. Az kontúrozást egy jelölő végezte. A kétes eseteknél szakértő döntött. A kiértékelés eredményét a 5. táblázat, a képenkénti eredményeket a függelék 16. táblázata tartalmazza.

5. táblázat. A karcnyom detektáló algoritmus kiértékelése

	pontosság	precizitás	szenzitivitás	specificitás
átlag	98,68%	98,03%	95,74%	99,48%
szórás	0,64%	1,26%	3,00%	0,33%
minimum	96,26%	94,20%	83,42%	98,37%
maximum	99,29%	99,77%	98,23%	99,95%

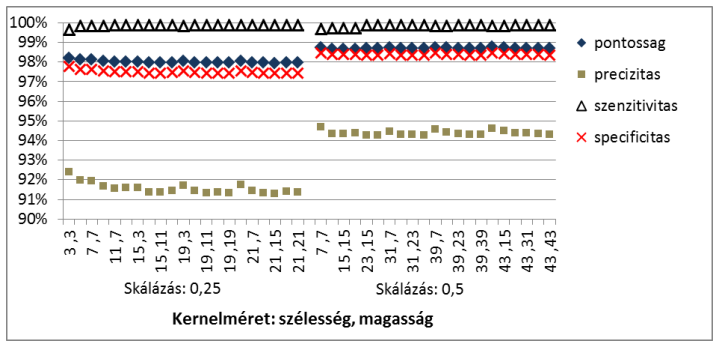
$$\begin{aligned}
 \text{pontosság} &= \frac{tp+tn}{tp+tn+fp+fn}, & \text{precizitás} &= \frac{tp}{tp+fp} \\
 \text{szenzitivitás} &= \frac{tp}{tp+fn}, & \text{specificitás} &= \frac{tn}{tn+fp},
 \end{aligned} \tag{2}$$

képletekkel definiáltak, ahol tp ill. fn azon karcnyompontok száma, melyet a program helyesen felismer ill. tévesen háttérként kezel, tn ill. fp azon háttérpontok száma, melyek a program helyesen felismer ill. tévesen karcnyompontnak vesz.

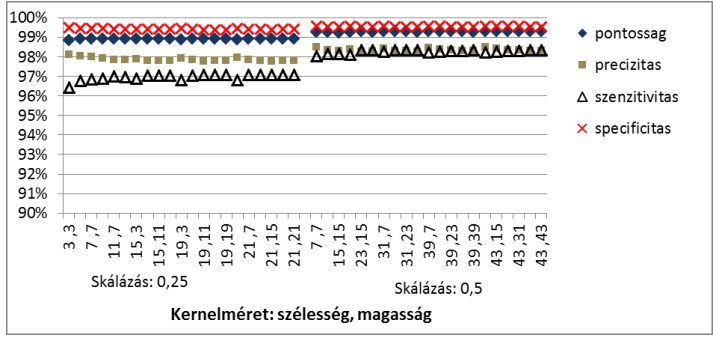
A sebesség méréséhez a C++ nyelvű implementációt Intel^(R) CoreTM i7-2630QM CPU-val és 8GB memóriával rendelkező notebookon, Windows 8.1 Enterprise 64 bites operációs rendszer alatt futtattuk. A tesztképeknél az átlagos futási idő 0,57 másodperc volt.

Érdemes még megvizsgálni, hogy a körvonal pontosítására irányuló törekvés mennyire éri el a célját. Ezt 25 képen vizsgáltunk a 2.4.4-es fejezetben szereplő S , a kiterjesztett karcnyom létrehozásánál használt struktúraelem, különböző méretei mellett. Az eredményeket 0,25-ös skálázási faktor mellett 0,5-ös értékre is megadjuk. Az karcnyom detektálása az előbbi kicsinyítésnél 0,44, utóbbinál már 3,39 másodpercet vett igénybe (a jellemzőszámítás nélkül mérve).

A 19. ábrán látható felső diagram a durva karcnyomra vonatkozó eredményeket, az alsó a végleges eredményeket mutatja. Szembetűnő, hogy a durva karcnyomra nézett precizitás szignifikánsan rosszabb volt az 1:4-es kicsinyítésnél, azonban a végeredményt tekintve már mérsékeltebb a negatív hatás.



(a durva karcnyomra vonatkozó értékek)



(a detektált karcnyomra vonatkozó értékek)

19. ábra. A körvonal pontosítás hatása a detektálás „jóságára” 25 tesztképen mérve, a durva karcnyom meghatározása során használt *S* struktúraelem különböző méretei mellett. A diagramokon nem szereplő paraméterek a tesztelés során állandók voltak.

3. Immunhisztokémiai festéssel kezelt csontvelőmetszetek elemzése

A myelofibrosis, azon csontvelővel kapcsolatos megbetegedések gyűjtőneve, melynek során retikulin- és kollagénrostok szaporodnak fel a csontvelőben [64]. A rostsaporulat jelenléte számos kórképben előfordulhat. A primer myelofibrosisban, a csontvelő sejtjeinek helyét fokozatosan fibrotikus szövet foglalja el, melynek nyomán a csontvelő egyre kevésbé képes ellátni alapvető feladatát, a vérsejtek megfelelő ütemben történő termelését. A rostsaporulat jelenlétének kimutatása és a mértékének meghatározása meghatározó a diagnózis megállapításának és a betegség előrehaladottságának szempontjából, melyhez a páciens csipő- vagy szegycsontjából származó csontvelő biopsziás minta elemzése szükséges [9]. A jelenlegi gyakorlat szerint rostok vizuális kiemelése Gömöri-féle ezüst impregnációval történik. A láthatóvá vált rostok mennyisége és a rostok által alkotott struktúra utal a betegség stádiumára. A szubjektív elemek kiküszöbölésének érdekében 2005-ben, a vizsgálatok végrehajtására és értékelésére vonatkozóan európai ajánlás született [116], azonban a manuális kiértékelés nem biztosítja a teljes objektivitást. A módszer másik hátránya, hogy nem nyújt információt a betegség korai fázisáról, amikor a folyamat visszafordítására, vagy legalább lefékezésére sokkal nagyobb esély mutatkozik, mint a későbbi stádiumokban.

A Debreceni Egyetem Pathologiai Intézetében aktívan kutatják a vérlemezke eredetű növekedési faktor receptor expresszióját, normál illetve a napi rutinban használt gradálási rendszer alapján kóros elváltozást mutató csontvelői mintákban, ugyanis számos rostsaporulattal járó kórképnél nyert már igazolást, hogy a rosttermelésért felelős sejtek működését, aktivitását ezen növekedési faktorok szabályozzák.

A kutatásba a vizsgálatok egyértelmű reprodukálása és a

szubjektivitás kizárása érdekében kapcsolódtunk be. Automatikus módszert dolgoztunk ki a digitalizált csontvelőmetsetek feldolgozására: a vérképző állomány detektálására és vérelemzke eredetű növekedési faktor receptor béta altípusának (PDGFR- β) expresszióját mutató területek meghatározására.

Az értekezés következő fejezetében a minták előkészítésének és digitalizálásának módját tárgyaljuk, majd az automatikus kiértékelés szempontjából releváns szakirodalom ismertetése következik, végül az általunk kidolgozott algoritmus és az elért eredmények kerülnek ismertetésre. Az orvosi háttér bemutatására csak az értekezés megértéséhez szükséges mértékben kerül sor, a részletek Bedekovics Judit doktori értekezésében [11] megtalálhatóak. Szintén nem térünk ki a program által szolgáltatott adatok alapján végzett statisztikai elemzésekre, ugyanis ezek is Bedekovics Judit munkáját képezték.

3.1. Szövetteni minták

A képfeldolgozó rész kialakítása és teszteléséhez 79 darab, a Debreceni Egyetem Belgyógyászati Klinika Hematológiai Osztályán kezelt betegektől származó crista biopsziás minta állt rendelkezésre. A minták közt 69 kóros és 10 kontroll eset szerepelt.

A minták formalin fixálással, dekalcinálással és paraffinba ágyazással lettek a metszetkészítésre előkészítve. Minden mintánál – természetesen a belőlük származó különböző metszeteken – a standard protokollnak megfelelően Gömöri-féle ezüst festés alkalmazására és a PDGFR- β expresszió kimutatására használható immunhisztokémiai festésre került sor. Utóbbi esetben az antigének lokalizációjához anti-PDGFR- β (ab-32570 vagy 3169) antitest került felhasználásra. Az antitest-antigén kötődés vizualizációja DAB (diaminobenzidin) oldattal, a sejtmagoké (és egyéb szöveteké) hematoxilin „festéssel” történt (láthatóvá fémionok hatására válik,

oxidációt követően). A eljárás részletes, precíz leírása megtalálható a [11]-ben.

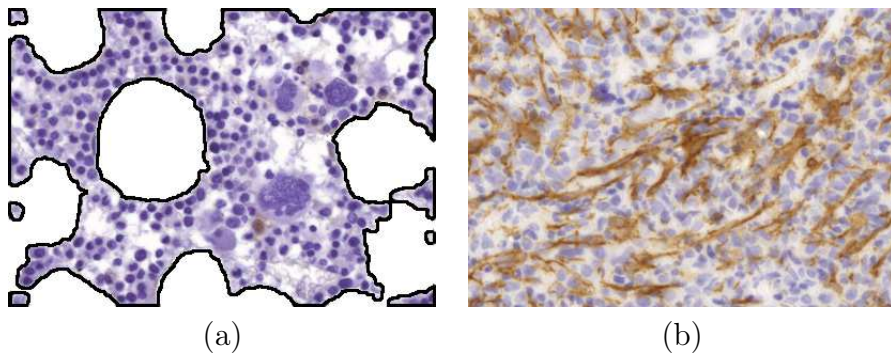
A metszetek digitalizálása Stingray F146C IRF Medical digitális kamerát tartalmazó 3D Histech Panoramic metszetszkennerrel történt, $20\times$ nagyítás és 1.0 gamma érték használata mellett, 24 BPP (RGB) színmélységgel. A metszetek mérete 175812×411940 pixel, ahol egy pixel kiterjedése $0.1644\ \mu\text{m} \times 0.1645\ \mu\text{m}$. A metszetek MIRAX (3DHISTECH MRXS) [44] formátumban voltak tárolva, melyen belül a részképek JPEG formátumban (minőség=75) kerültek mentésre.

3.1.1. Biopsziás mintában megjelenő struktúrák

A csontvelői biopsziás metszetek elemzése során az egyik legfőbb kihívás a diagnosztikai szempontból érdektelen részek megfelelő elkülönítése a vérképző állománytól. A mintavétel módjából adódóan természetes jelenség ha például csontgerenda, izomszövet vagy kötőszövet darabok kerülnek a mintába. A festési eljárás kiválasztásánál nem lehet mindezekre tekintettel lenni, így ezen struktúrák is rendre megfestődnek. Az algoritmus működésének megértéséhez fontos ismerni az egyes szövetek megjelenését, ezért az alábbiakban rövid áttekintést adunk a biopsziás mintákat alkotó elemekről és azok vizuális megjelenéséről.

Egy ideális mintában kizárólag a vérképzőállomány sejtjeivel, valamint zsírsejtekkel találkozánk. Utóbbi az elemzés során a háttérrel együtt kezelhető, ugyanis egyáltalán nem, vagy csak nagyon halványan festődik meg. A kontroll mintákban szinte csak a hematoxin hatása érvényesül, mely sötétkékre színezi a sejtmagokat. A sejtplazma, ha egyáltalán festődik, akkor világosabb kék (20.a ábra) vagy szürkés árnyalatú, ritkábban, a DAB festés hatására, halvány barna. A kóros mintákban a DAB festés kiemeli az immunpozitivitást mutató részeket, melyek izoláltan, vagy

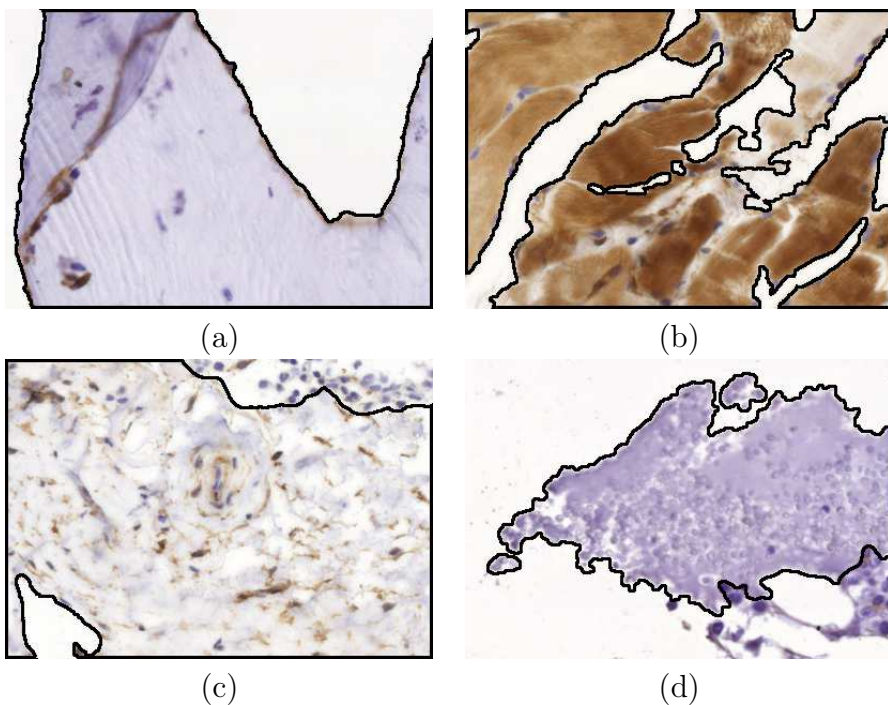
lazább-sűrűbb rosthálózatot alkotva jelennek meg. A 20.b ábrán látható részlet egy kóros, az MF grádusrendszer szerint 2-es grádusú mintából származik, melyet laikusként a „közepesen súlyos” kifejezéssel illethetnénk. A DAB festés hatására kiemelkedő rostok már jól láthatóan hálózatot formáznak.



20. ábra. Vértképző állomány részletek: (a) kontroll minta (a vértképző állomány fekete vonallal határolva), (b) kóros, rostos elváltozást mutató minta

Nem nehéz elképzelni, hogy súlyosabb esetben a rostok még inkább átszövik a mintát, ezért újabb kóros esetek helyett térjünk át a nem kívánatos elemekre. A csontgerendákra (21.a ábra) egyértelműen a hematoxilin hat, ezért kék színben jelennek meg, míg az izomszövetet a DAB festés barnára színezi. Az általunk használt nagyításban mind a két szövet felülete viszonylag sima, csak úgy, mint a reguláris kötőszövet felülete.

A feldolgozás szempontjából a legkellemetlenebb a gyűrött hatást keltő irreguláris kötőszövet megjelenése, melyben a festésre reagáló sejtmagok is rendre feltűnnek (21.c ábra). Szintén számolnunk kell a véralvadék megjelenésével (21.d ábra) mely tipikusan szürkés, szürkés-lilás megjelenésű, akár a megfestődött sejtmagok közti plazma a vértképző állományban.



21. ábra. Csontvelő biopsziás mintában gyakran megjelenő elemek: csontgerenda (a), izomszövet (b), irreguláris kötőszövet (c), véralvadék (d)

3.2. Irodalmi áttekintés

Jelenleg – legjobb tudomásunk szerint – nem ismert olyan eljárás, ami hematoxilin-DAB festéssel kezelt, rotszaporulatot mutató csontvelői minták szegmentálására szolgálna, ezért az alábbiakban az immunhisztokémiai módszerrel kezelt metszetek feldolgozásakor általánosan használt eljárásokat tekintjük át, majd részletesebben ismertetjük azon módszereket, melyek többé-kevésbé hasonló probléma megoldására irányulnak.

Festések szétbontása

A patológiában gyakran alkalmaznak kettős vagy többes festést a mintában szereplő különböző struktúrák eltérő színnel való megjelenítéséhez. Az ilyen jellegű mintákon a digitális elemzés egyik legfontosabb lépése a többféle festés szétbontása, melyet általában további „tisztító”, szegmentáló lépések követnek az esetlegesen megfestődő, de nem a keresett struktúrákhoz tartozó és a lényeges részek elkülönítése érdekében.

Az egyik legszélesebb körben használt módszer a Ruifrok és Johnston által publikált szín dekonvolúció [88]. A szerzők a Lambert-Beer törvény alapján a

$$I_C = I_{0,C} \exp(A\alpha_C) \quad (3)$$

képlettel írták fel a CCD szenzorba jutó fény intenzitását minden C csatornára, ahol $I_{0,C}$ a beeső fény intenzitását, A a festék mennyiségét és α_C az egyedi festések RGB komponensekre vonatkozó abszorpciós faktorait jelöli. Az (3.2) képlet alapján az optikai sűrűség és a festék mennyisége közt lineáris összefüggés adható meg:

$$OD_c = -\log_{10} \left(\frac{I_c}{I_{0,c}} \right) = A\alpha_C,$$

így lehetővé válik az RGB kép felbontása az egyedi festéseket tartalmazó képekre. A gyakorlatban α érték tapasztalati úton kerül meghatározásra: egyszeres festések elszíneződött területei alá eső, vagy a többes festésen manuálisan kijelölt egyszeresen festődő területei alá eső pixelértékek csatornánként vett átlagaként.

Szintén széles körben elterjedt megoldás az RGB kép olyan színmodellbe való konvertálása, olyan transzformációja, ahol az adott festésre jellemző kromatikus információk jobban elválaszthatók egymástól [65, 83]. Brey és társai kísérleti úton

igazolták, hogy a DAB és a hematoxin festés a normalizált kék ($255B/(R + G + B)$) csatorna alapján küszöböléssel jól elkülöníthető, de a színkonvolúció és a HSI színmodell is alkalmas a célra. Mindhárom módszernél erős korrelációt ($r > 0.99$) mértek az automatikus jelölés és a szakértők jelölése között. Előbbi két eljárás a sejtek és a szövet rész elválasztásában bizonyult egy hajszállal jobbnak [15].

A módszer kiválasztását megkönnyíthetné az a tény, hogy a DAB festés szórja a fényt, tehát a Lambert-Beer törvény nem alkalmazható rá [39, 118], azonban még ennek ellenére is több kutató javasolja a színkonvolúció használatát a H-DAB festésekre [89, 115, 119]. Más kutatók viszont a DAB – vagy más hasonló tulajdonsággal rendelkező – festés esetében eltérő gyakorlat alkalmazását szorgalmazzák [38, 40, 113], mint például a fényt szóró festékek *a priori* ismeretekre épülő eltávolítását a dekonvolúció előtt [40], vagy pl. a bőrdetektálásnál használt statisztikai modellek [54] alkalmazását [98]. Abban legalább egyetértés látszik, hogy DAB festés esetében az intenzitás értékek a festék mennyiségének kimutatására nem alkalmazhatók, csak a struktúrák lokalizálásához.

Gyűrődés detektálás

A metszetkészítés során a mintát tartalmazó paraffinblokkból nagyon vékony, néhány mikrométer vastagságú szeletek kerülnek levágásra. A folyamat közben a minta egyes helyeken felgyűrődhet, mely az elemzésnél természetesen problémát okozhat. A megvastagodott részek sötétebben jelennek meg a felvételen, hamis élek jelennek meg, és különböző struktúrák is átfedésbe kerülhetnek. A legtöbb automatikus elemző módszer viszont nem foglalkozik a jelenséggel. Feltehetően azért, mert ritkán érintett a metszet olyan nagy része, ami lényeges mértékben befolyásolhatná az eredményt, másrészt a gyűrődéseket nehéz robusztus módon felismerni. Ennek

ellenére az irodalomban található néhány javaslat a probléma megoldására.

Palokangas és társai [81] eljárása azon alapul, hogy a gyűrődéseknél magasabb szaturáció és alacsonyabb intenzitásértékek figyelhetők meg, mint a minta több részén. A megfigyelésre építve a képpontokat a szaturáció és intenzitásérték különbsége alapján osztályozták. A szerzők K-meanst vetettek be, melynek „mellékhatása”, hogy ha nincs a képen gyűrődés, az algoritmus akkor is hajlamos „megtalálni” azt [63]. Bautista és Yagi [10] hasonló elvet követtek munkájukban, de az osztályozás helyett fix paraméterrel végrehajtott vágást alkalmaztak. Standardizált körülmények közt ez nem elvetendő gondolat, azonban ha ez nem biztosított, akkor érdekesebb Kothari és társai [63] adaptív vágást használó módszeréből kiindulni. A felhasználhatósága még utóbbi módszernek is korlátozott, hiszen a kétszeres vagy többszörös festéseknél az egyedi festések erőssége eltérhet, hamis detektálásra ítélve ezzel a gyűrődésdetektáló eljárásokat.

Sejtmagok, plazma detektálása

A sejtek vagy sejtmagok detektálásának, számuk meghatározásának gyakran van központi szerepe a metszetek elemzésekor. A megoldás lényegi lépése gyakorta még a laborokban megtörténik, ugyanis a szövetkiemelésre rutinszerűen használt hematoxinból az oxidáció hatására hematein képződik, mely a negatív töltésű szövetrészekhez kapcsolódik. A sejtmagok negatív töltésük miatt környezetüknél erősebben festődnek, ezért is nevezik a hematoxilint magfestésnek. Ha a hematoxin mellett eosin festés is történik, akkor a sejtmagok sötétkékben, más struktúrák (pl. a sejtplazma) rózsaszínben tűnnek fel a felvételen [51], így az előző fejezetben ismertetett festés felbontással elkülöníthetők a sejtmagok a többi struktúrától.

A plazma és a sejtmagok közt fellépő színelkülönbség,

intenzitáskülönbség megnyitja az utat a küszöbölésre vagy lokális maximumhely meghatározására épülő eljárások előtt [30, 45, 38, 119], de a képpontok kevert Gauss modellek alapján történő besorolására is számos példa található [47]. A precízebb végeredmény elérése érdekében ezeket a módszereket általában még egy újabb szegmentáló lépés követi, például Watershed transzformáció [120], aktív kontúr, vagy gráf-vágás [3, 23].

A különféle eljárásokat hosszan lehetne még sorolni, – az érdeklődő olvasók Irshad és társai témába vágó összefoglalóját [50] ajánljuk – a csontvelő minták feldolgozásakor azonban megelégedhetünk valamely kevésbé pontos módszerrel is. Egyrészt azért, mert a rostképződés hatására a sejtek olyan mértékben deformálódhatnak, amikor a kromatikus információn kívül más már nem utal arra, hogy a látott „masszát” valójában vérsejtek alkotják, másrészt például az esetlegesen fellépő sejtszegénység miatt, a sejtszám, vagy sejtmagok által elfoglalt terület nem lehet viszonyítási alap a pozitivitás mértékének megítélésékor.

Csontgerendák, zsír, vérképzőállomány

A céljainkhoz legközelebb álló probléma, melyre a szakirodalomban képfeldolgozással támogatott megoldást találtunk a metabolikus csontbetegségben szenvedő páciensek csontvelőmintájának elemzése, ahol a cél a metszetben lévő zsír, csontgerenda és vérképzőállomány arányának meghatározása.

Az egyik lehetséges megközelítés a textúrabeli eltéréseket használja ki. Meschino és társai például kétféle jellemzővektor felhasználási lehetőségét vizsgálták. Az egyik vektort az együttes előfordulási mátrix (GLCM) alapján számolt paraméterek, a másikat a kép Fourier spektrum erősség függvényének első és negyedik kvadránsba eső értékei alkották. A módszer interaktív; a tanításhoz szükséges jellemzők az adott képen szakértő által csontként, zsírként ill.

vérképzőállományként megjelölt pontok alapját történik [75].

A csontgerendák detektálásának egy másik lehetősége, a sejtek és a csontgerendák közti méretbeli eltéréseket is kihasználja. A háttér a zsírsejtek és a sejtmagok eltávolítása után elméletben csak a csont a plazma marad a mintán. A lyukacsossá vált plazma pedig morfológiai erózió alkalmazásával szétbontható, míg a csontgerendák általában egyben maradnak [97]. Ezen megközelítés előnye, hogy gyors és nem túlzottan érzékeny a festés minőségére.

Megemlítendő még Gonzalez és társai szegmentáló eljárása is [41], melyet a szerzők hematoxin-eosin festéssel kezelt csontvelőmintákon teszteltek a csontgerendák háttértől és vérképző állománytól való elválasztására használva. A Watershed transzformációval túlszegmentált képek régiói K-means algoritmussal négy osztályba (csontgerenda, zsír, vérsejt és sejtközi állomány) kerültek besorolásra a régiók által tartalmazott pixelek intenzitásának átlaga és szórása alapján. A végeredményt újabb Watershed transzformáció szolgáltatta, a csontgerendából kialakított markerek felhasználásával. Egy későbbi cikkükben a szerzők már csak két osztály (csontgerenda és minden más) használatát javasolják [42].

Fibrotikus stuktúrák

Azoknál az eljárásoknál, ahol a fibrotikus rész detektálása hangsúlyos, az egyik festés általában a rostok vizuális kiemelésére szolgál. A festés módjától függően itt is a korábban már taglalt festék elkülönítésére használt módszerek, illetve „egyszerű” küszöbölés [71], esetleg kromatikus intenzitásértékek alapján történő osztályozás alkalmazása a megszokott [99, 123].

Elvértve találkozhatunk textúrabeli különbségekre építő megoldásokkal. Ilyen például Matalka és társainak algoritmus, mely a piramisképek három szintjén számolt jellemzők alapján

különbözteti meg a normál és fibrotikus struktúrákat. Minden szinten azonos, Laws textúra energia [4] és szomszédsági szürke-skálás különbség mátrix (NGTDM) alapján számolt textúraleírókat (durvaság, kontrasztosság, komplexitás, energia stb.) használtak [72]. A fibrotikusnak minősített szürkeárnyalatos képeket 16×16 -os blokkokra osztva, K-means algoritmus használatával szegmentálják. Ennél a lépésnél már csak két, egyszerűen számolható jellemző kerül felhasználásra: a blokk intenzitásértékeinek szórása és a blokk bináris alakított változatában a fekete és fehér pontok aránya. Végül a szakadozott rostokat morfológiai műveletekkel állítják helyre.

3.3. Automatikus képelemzés

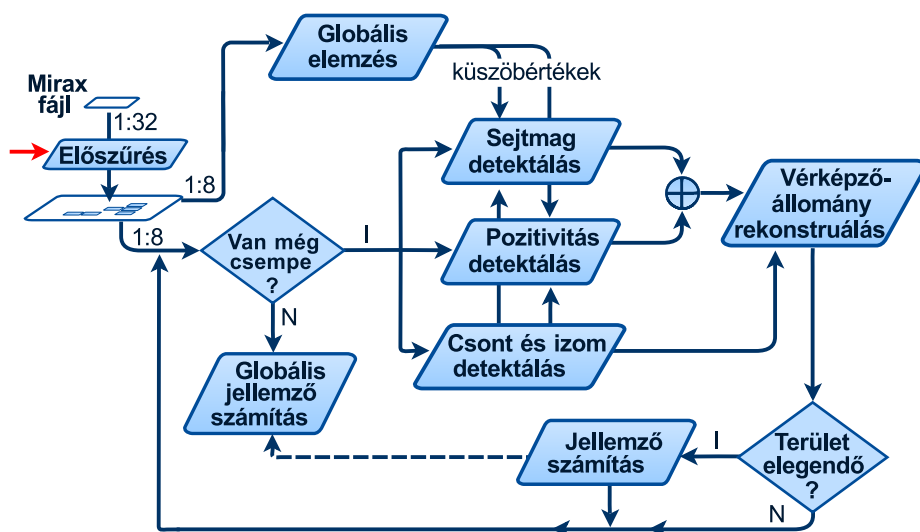
Ahogy azt már korábban említésre került, az automatikus képelemzés célja a vérképző állomány és azon belül a PDGFR-*beta* expressziót (későbbiekben *immunpozitivitás*, *pozitivitás*) mutató területek detektálása és az expresszió mértékének kifejezésére szolgáló mutatók kialakítása.

Az algoritmus kidolgozása során nem feledkezhetünk meg a rostképződés csontvelőállományra gyakorolt hatásáról sem, de a más kórképpel is összefüggésbe hozható esetleges sejtszegénység lehetőségét is szem előtt kellett tartanunk.

A fejezetben tárgyalt módszer a [111]-ben publikált változat továbbfejlesztésének tekinthető. A változtatások egy része, mint például az előszűrő bevezetése, a futási idő csökkentését célozza, más részüket az tette szükségessé, hogy a DE Pathológiai Intézetéből érkezett minták festésének erőssége néhol jelentős eltérést mutatott és az antitest utánrendelése után megnőtt azon metszetek száma, ahol a háttér, és a plazma is festődött.

3.3.1. A képelemző rendszer áttekintése

A metszetek feldolgozásához kialakított eljárás főbb lépései a 22. ábrán láthatók. A folyamat megértéséhez fontos tudni, hogy a metszetek tárolására használt mirax formátum egy csonkolt képpiramis segítségével reprezentálja a tárgylemezeket, ezzel támogatva a kép különböző felbontásban való elérését. A piramis legalsó szintje a szkennelés során nyert teljes képet tartalmazza, míg a legfelső szintjén annak 1:512 méretarányban kicsinyített mása áll. A kép minden szinten 256×256 -os méretű képkockaként kérhető le, ezért a feldolgozás egységének a 256 egynél nagyobb, egész számú többszörösét érdemes választani [44].



22. ábra. A képfeldolgozó algoritmus főbb lépései

A digitalizált metszetek teljes mérete 175812×411940 pixel, ezért a hatékony feldolgozás érdekében alacsony felbontás mellett előszűrést végeztünk annak meghatározására, hogy mely csempéket szükséges részletesen elemezni.

A szűrőn átjutott csempék elemzését 1:8 arányú kicsinyítés mellett

végeztük, 768×768 -as csempeméretet használva. A szint választását az indokolta, hogy alacsonyabb felbontásnál a plazma és a sejtmag már nem különül el megfelelő módon, míg a magasabb felbontás használata a rostosodás megfigyelését és a nagyobb objektumok, mint például a csontgerenda detektálását nehezíti, az egy csempe által lefedett szövetrész méretének csökkenése miatt.

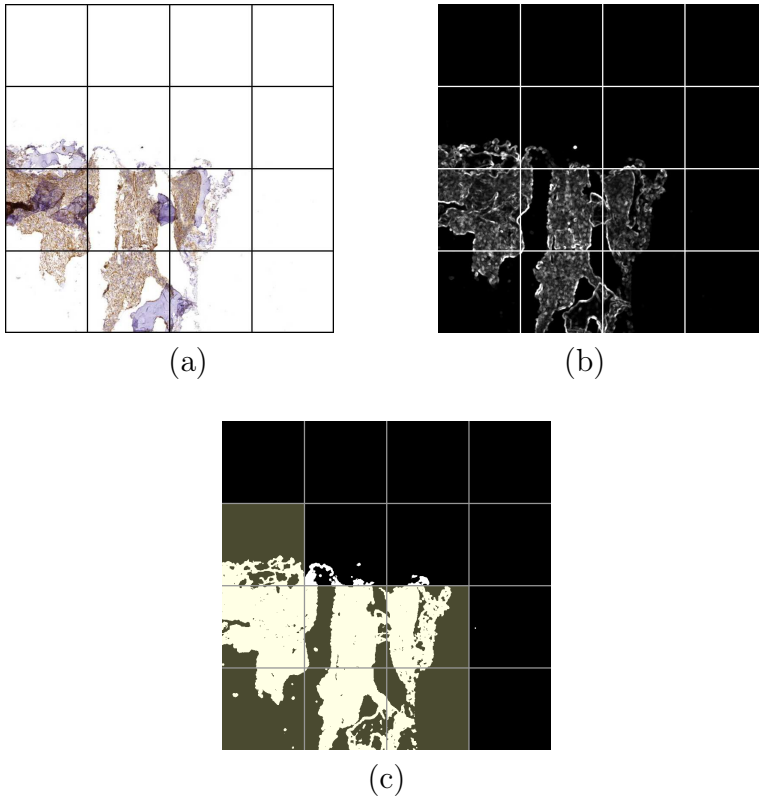
3.3.2. Előszűrés

A metszetek automatikus digitalizálásakor a teljes tárgylemez rögzítésre kerül. A részletes elemzéshez szükséges nagyításban ez közel 2000 csempét jelent, azonban érdemi információt legfeljebb pár száz csempe tartalmaz, a többi vagy teljesen üres, vagy nincs rajta elegendő mennyiségű vérképző állomány a metszet leírására szolgáló jellemzők számításához.

A csempék telítettsége alacsony felbontásban is jól becsülhető, a vérképzőállomány és az egyéb struktúrák elválasztásával kapcsolatosan viszont körültekintőnek kell lenni, mert a betegség stádiuma, a festés erőssége illetve a plazmára és háttérre gyakorolt hatása jelentősen befolyásolja mennyire különülnek el egymástól a hasznos és a kidobandó területek. Példának okáért a 23.a ábrán látható esetben a csontgerendák és a vérképzőállomány színezet alapján jól elkülönülnek, egy kevésbé súlyos esetben ez csak akkor lenne igaz, amennyiben a plazma barnás elszíneződést mutat. Amit a betegség stádiumától és a festés minőségétől függetlenül ki lehet használni, az a gyűrődésmentes csontgerendák és a vérképzőállomány textúrabeli eltérése.

Tekintve, hogy a háttér a csontgerendákhoz hasonlatosan sima, ezért a kidobandó és a potenciálisan hasznos rész elkülönítése kizárólag a textúra alapján történik, melyet minden pontban a pont körüli, 5×5 -ös ablak alá eső intenzitásértékek szórásával jellemzünk. A szórás kép egész értékre konvertált változatára alkalmazott Otsu

vágás [80] eredményeként előállt képet 4×4 alcsempére osztjuk fel, melyek így az 1:8 méretarányban lekérhető csempéknek alacsony felbontású megfelelői. Amennyiben egy alcsempén az előtérpontok száma eléri a 10%-ot, a megfelelő magas felbontású csempe koordinátáit eltároljuk, az adott rész további elemzésre kerül (23. ábra).



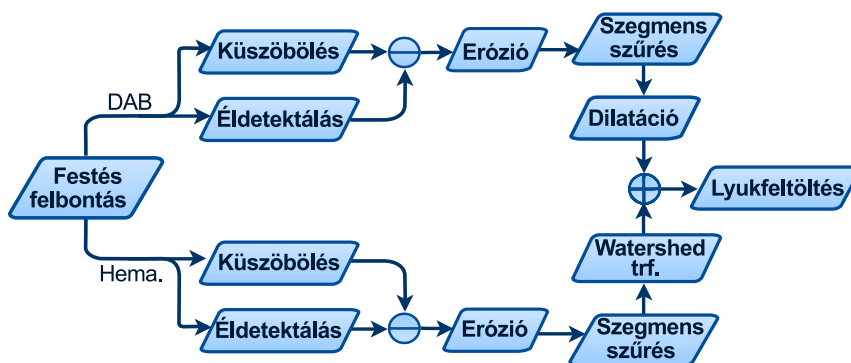
23. ábra. Előszűrés: (a) 1:32 méretarányú csempe képe (a rácsok az 1:8 méretarányú csempék határvonalait jelölik), (b) szórás kép, (c) a küszöbölt szórás kép, barnával jelölve a nagyobb felbontásban is feldolgozandó csempék

3.3.3. Csontszerű és izomszerű objektumok detektálása

A 3.2. fejezetben ismertetett eljárások más festési módszerhez, rostos elváltozást nem mutató minták szegmentálásához lettek kialakítva ezért adaptálni kellett azokat a rendelkezésre álló mintákhoz.

A metabolikus csontbetegségekhez fejlesztett módszerekkel szemben az eljárásunk nem feltételezi, hogy csak háttér, vérképzőállomány, zsír és csontgerenda jelenik meg a mintában, azonban nincs is szükségünk a csontgerendák mennyiségének meghatározására, tehát nem is törekszünk a csontgerendák és izomszövet darabok, más hasonló objektumoktól való megkülönböztetésére.

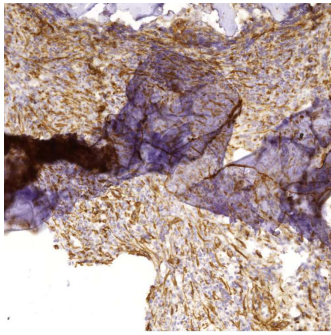
Az eljárás főbb lépései az 24. ábrán láthatók. A továbbiakban ezen lépések szerepét és pontos végrehajtási módját vesszük sorra.



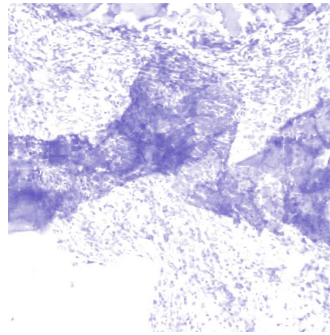
24. ábra. Csontszerű és izomszerű objektumok detektálásának főbb lépései

Az általuk használt festési eljárás oldja a csontot, melynek egyik kellemetlen hatása, hogy a csontdarabkák gyakran elmozdulnak eredeti helyükről és átfedésbe kerülnek a vérképző állománnyal. A lila és a barna festést tartalmazó részek elkülönítésére ezért a Ruifrok-Johnston-féle eljárást [88] alkalmaztuk (25. ábra), mely a

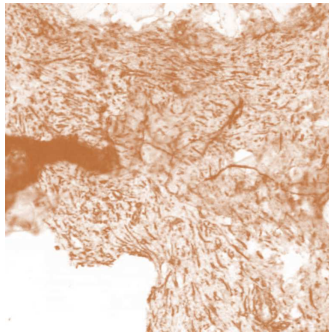
pixeleket kizárólagosan egyik vagy másik festéshez soroló módszerekkel szemben kedvez a struktúrák egyben tartásának.



(a)



(b)



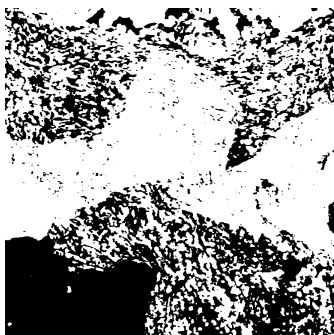
(c)

25. ábra. Festékek szétbontása Ruifrok és Johnston eljárásával [88] : (a) eredeti kép, (b) Hematoxilín, (c) DAB

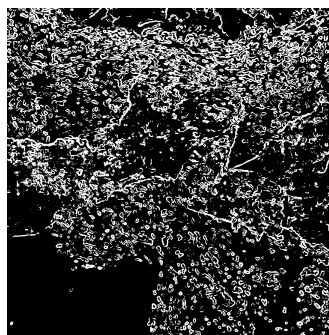
A felbontás után a hematoxilint (I_{hema}) és a DAB (I_{DAB}) festést tartalmazó képet is hasonlóan dolgozzuk fel. Első lépésként küszöbölést hajtunk végre, mely mindkét ágon csak a festéket tartalmazó rész maszkjának előállítására szolgál. Elméletileg a felbontást követően minden 255-től kisebb értékű pont festés jelenlétére utal, a gyakorlatban egy kicsit alacsonyabb 250-es értéket használtunk (26.a ábra).

Törölve a maszkból azokat a pontokat ahol viszonylag erős él

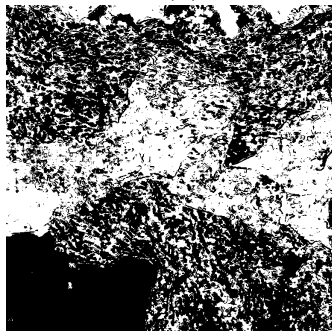
található, egy lyukacsos szerkezet alakul ki a sejtmag és a sejtplazma határánál illetve rostokat tartalmazó területeknél, melyet egy morfológiai erózióval még kisebb darabokra bonthatunk. Ezzel szemben a csontgerendák, izmok és más hasonlóan homogén színezetű struktúrák vagy teljesen egyben maradnak, vagy a gyűrődések mentén esnek szét, a sejtekhez képest nagyobb darabokat alkotva (26.b-c ábra).



(a)



(b)



(c)



(d)

26. ábra. Csontgerenda szűrés lépései a 25.a képre: (a) hematoxilin festékkal fedett terület maszkja, (b) hematoxilin képre alkalmazott éldetektálás eredménye, (c) maszk és élkép különbsége, (d) a különbségképre alkalmazott erózió

A korábbi cikkünkben [111] az éldetektálást a szürke-skálás képen és a telítettséget tartalmazó csatornán végeztük. A hematoxilin és

DAB csatornákon viszont hatékonyabbnak bizonyultak a [97]-ben alkalmazott eljárás, mely morfológiai gradiens számításból, [0, 255] intervallumra való normalizálásból és egy küszöbölésből áll. A szerzők az eljárást a sejtmagok detektálására használták, mi az élek detektálásához kisebb, 3×3 -as, kereszt alakú struktúraelemet használtunk. (A küszöbértéket, tesztek alapján, 35-ös értékre állítottuk.)

A megmaradt objektumok közül méret alapján választjuk ki azokat, melyek túlzottan nagyok ahhoz, hogy sejtek, vagy rostdarabok legyenek.

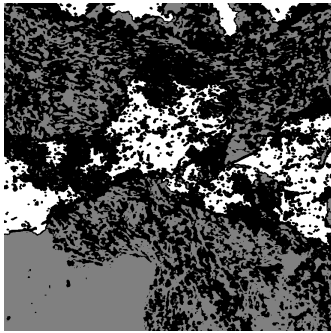
A csontgerendák detektálására szolgáló ágon a nagyméretű objektumokat belső markerként felhasználva Watershed transzformációt hajtunk végre az RGB képen, mely az átfedések vagy gyűrődések miatt esetlegesen széteső csontgerendák rekonstruálására szolgál. Külső markerként a festetlen területeket ($I_{hema} = 255$) használtunk.

Végül a csont- és izomszerű objektumokat tartalmazó maszkok összeolvasztása (*pontonkénti logikai vagy művelet*) után lyukfeltöltést hajtunk végre és dilatáció segítségével kiterjesztjük a kapott maszkot. A dilatáció egyrészt az izomszerű objektumoknál az erózió hatását kompenzálja, másrészt a csontgerendák szélein rendre (nem csak kóros mintáknál) megjelenő, pozitivitást mutató területek is bekerülnek a maszkba (27. ábra).

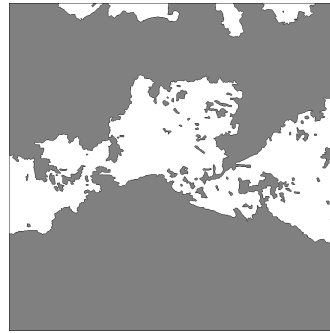
3.3.4. Globális elemző

A lépés célja egy-egy olyan küszöbérték meghatározása, mellyel a Hematoxilin, illetve a DAB festésű részeken belül elkülöníthető a halványabb festődésű plazma vagy a megfestődött háttérrész az erősebben festődő sejtmagoktól, rostoktól.

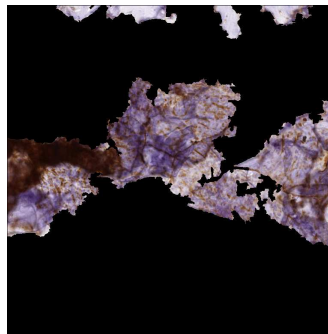
Habár a metszet feldolgozása alapvetően csempénként zajlik, a



(a)



(b)



(c)

27. ábra. Csontgerenda szűrés lépései a 25.a képre: (a) Watershed szegmentáláshoz használt markerek (fehér-belső, szürke-külső), (b) a szegmentálás eredménye, (c) a csont és izomdetektálás eredménye

küszöbök megállapításánál az első szűrőn átjutott összes csempét figyelembe vesszük annak érdekében, hogy az automatikusan megállapított határ egységes legyen az egész digitális metszetre vonatkozóan.

A DAB és a Hematoxin festést tartalmazó képet az RGB képként lekért csempére alkalmazott színkonvolúció [88] biztosítja. A bontáshoz a képet egy zajszűrő lépéssel készítjük elő, melyet egy 3×3 -as maszkkal, $\sigma = 1$ paraméter mellett csatornánként végzett Gauss szűréssel valósítunk meg.

A küszöbérték meghatározása Otsu eljárással [80] történik a DAB, illetve a hematoxinin kép festéssel fedett részein ($I_{DAB} \leq 250$, $I_{hema} \leq 250$) a festés „erősség”, vagyis a pixelértékek empirikus sűrűségfüggvénye alapján.

3.3.5. Immunpozitivitás detektálása

A festés felbontás által adott I_{DAB} kép alapján megállapíthatjuk mely területeken hatott a DAB festés, azonban ez nem ad arról információt, hogy az adott részen a DAB, vagy a hematoxinin festés-e a domináns. Tekintve, hogy a festések különböző erősségűek is lehetnek, a két festés egymással való összehasonlítása sem volna szerencsés. Ezért inkább a barna színű területeket határozzuk meg a kép HSV térbe konvertált változata, annak is az emberi színlátáshoz közel álló Hue csatornája alapján. Ezen belül a plazma és a pozitivitást mutató sejtmagok, rostok elkülönítéséhez már a DAB festés erősségét vesszük figyelembe. Az eredményképből a korábban csontként, vagy izomként detektált részek természetesen kizárásra kerülnek (28. ábra).

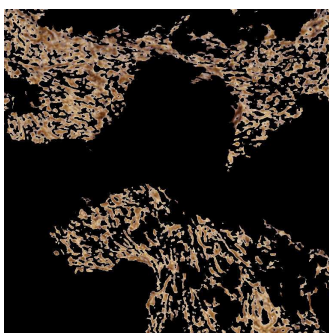
A pozitivitást mutató pixelek halmazát tehát a

$$B = \{ p \mid I_{hue}(p) < 60 \text{ és } I_{dab}(p) < t_{dab} \text{ és } p \notin L \} \quad (4)$$

képlet adja, ahol az I_{hue} a csempe HSV színtérbe konvertált változatának H csatornája, I_{dab} a festés felbontással keletkezett DAB festést tartalmazó kép, L a csontként és izomként detektált pixelek halmaza, a t_{dab} pedig a *Globális elemző* által adott küszöbérték.

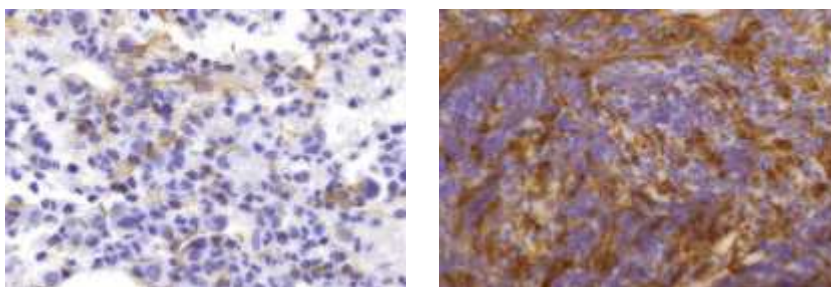
3.3.6. Sejtmag detektálás

A 3.2. fejezetben már kitértünk arra, hogy a rostosodás hatására a sejtmagok erősen deformálódhatnak, összepréselődhetnek (29.



28. ábra. A 25.a kép innumpozitivitást mutató területei

ábra), ezért a detektálás során a kromatikus információkra kell hagyatkoznunk.



(a)

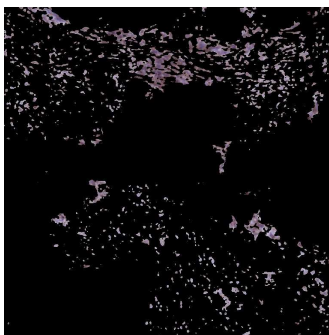
(b)

29. ábra. Jól elkülönülő (a), illetve rostok által összepréselt sejtmagok (b)

A módszer teljesen analóg a pozitivitást mutató részek meghatározásával, a különbség mindössze az, hogy ezúttal a lila területek az érdekesek, ezért a színezetnél használt tartomány megváltozik, valamint a „normális” sejtmagok és az esetlegesen lilára festődött plazma elválasztásához a hematoxilin festést tartalmazó képet (I_{hema}) használjuk. A korábban csontnak nyilvánított területeket természetesen most is kizárjuk, így az eredményt a

$$P = \{ p \mid 160 < I_{hue}(p) < 240 \text{ és } I_{hema}(p) < t_{hema}(p) \text{ és } p \notin L \}$$

képlet adja, ahol I_{hema} a festés felbontással keletkezett hematoxin festést tartalmazó, t_{hema} a *Globális elemző* által adott küszöbérték (30. ábra). (A többi jelölés feloldása a (4) képletnél megtalálható.)



30. ábra. A 25.a kép sejtmagokat tartalmazó területei

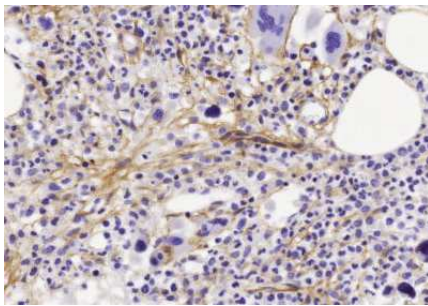
3.3.7. Véréképzőállomány rekonstrukció

Az előző lépések során detektált pozitivitást mutató területek és a sejtmagok, illetve a sejtplazma képezi a véréképző állomány értékes részét. A plazma viszont nem feltétlenül festődik elég erősen ahhoz, hogy a háttértől elkülöníthető legyen (31. ábra), ilyenkor annak jelenlétére a sejtmagok és a rostok közelségéből következtethetünk.

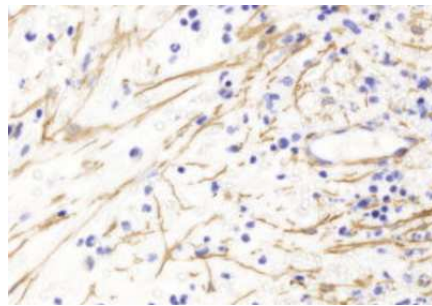
A rekonstrukciót a sejtmagok és a pozitivitást mutató részek közti hézagok feltöltésével kezdjük, amit egy 25×25 -ös (M_1) illetve 35×35 -ös (M_2), körlap alakú struktúraelemmel végrehajtott morfológiai zárással érünk el, természetesen ügyelve arra, hogy csontszerű objektumok ne kerüljenek bele a kiterjesztett részekbe:

$$E_1 = ((P \cup B) \bullet M_1) \setminus L,$$

$$E_2 = ((P \cup B) \bullet M_2) \setminus L.$$



(a)



(b)

31. ábra. Festődött (a) és nem festődött plazma (b). Utóbbi képen sejtszegénység is megfigyelhető.

A kisebb méretű struktúraelem a sejtszegény mintáknál nem ad megfelelő eredményt, a nagyobb méretű struktúraelem alkalmazásánál viszont a zsírsejtek is a hasznos részbe kerülnének, csak úgy, mint a nyomokban sejtmagokat tartalmazó véralvadék és kötőszövetdarabok. Önmagában tehát az E_2 használata sem jelentene megoldást.

Ahhoz viszont már elég a kisebb kiterjesztés is, hogy a korábban esetlegesen egyetlen, vagy több nagyobb egységet alkotó üres területek a vérképzőállományon belüli lyukakká alakuljanak át, melyek besorolásáról az alábbi jellemzők alapján döntünk:

- terület,
- körszerűség,
- festődött pontok száma egy pixelre vonatkoztatva,
- átlagos intenzitásérték,
- környezeti hatás.

A körszerűséget, melyet a zsírsejtek jellegzetes ovális alakja miatt

választottuk be a jellemzők köré a

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}$$

képlet alapján számoltuk, ahol P a lyuk területét, az A a lyuk területét jelöli.

Festődöttnek ezúttal is az $I_{dab} \leq 250$, illetve az $I_{hema} \leq 250$ egyenlőtlenségeket kielégítő pixeleket tekintettük.

Az átlagos intenzitásértéket a csempe szürkeárnyalatossá alakított változatán számoltuk. Az átalakítás a

$$Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$$

képlettel történt [5], ahol Y az eredményképet, az R , G , B az eredeti kép piros, zöld és kék csatornáját jelöli.

A környezeti hatás számításához a feldolgozott csempével azonos méretű segédképet állítunk elő, melynek minden pontja megadja, hogy az adott pont biztos előtér (pozitivitás vagy sejtmag), csont, vagy azok közelében lévő pont-e. A kép létrehozásához a

$$I_k(p) = \begin{cases} 1, & \text{ha } p \in P \cup B, \\ -1, & \text{ha } p \notin E_2, \\ -2, & \text{ha } p \in L, \\ 0, & \text{különben} \end{cases} \quad (5)$$

képletet használtuk.

Egy képpont környezeti hatását (K) a pont közelében lévő pontok súlyozott átlagaként adjuk meg,

$$K(x, y) = G(x, y) * I_k(x, y) \quad (6)$$

ahol a $*$ a konvolúció jele és

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

M_2 méretével azonos nagyságú 2D-s Gauss kernel, a σ érték a kernelméret hatoda.

A teljes lyukra vonatkozó K értékek a lyukat alkotó pixelekre vonatkozó K értékek összegét tekintettük.

Látható, hogy a már előtérként detektált pontok (sejtmagok és pozitivitást mutató területek) pozitív, míg a csontként vagy izomként detektált pontok negatív súllyal esnek latba. Szintén negatív irányba billentik a mérleget a nagyobb kiterjedésű fehér területek, tehát az E_2 -n kívül eső részek. Az M_1 és M_2 maszkok méretével szabályozható, hogy mekkora területet tekintsünk semlegesnek a mintán belüli részekben.

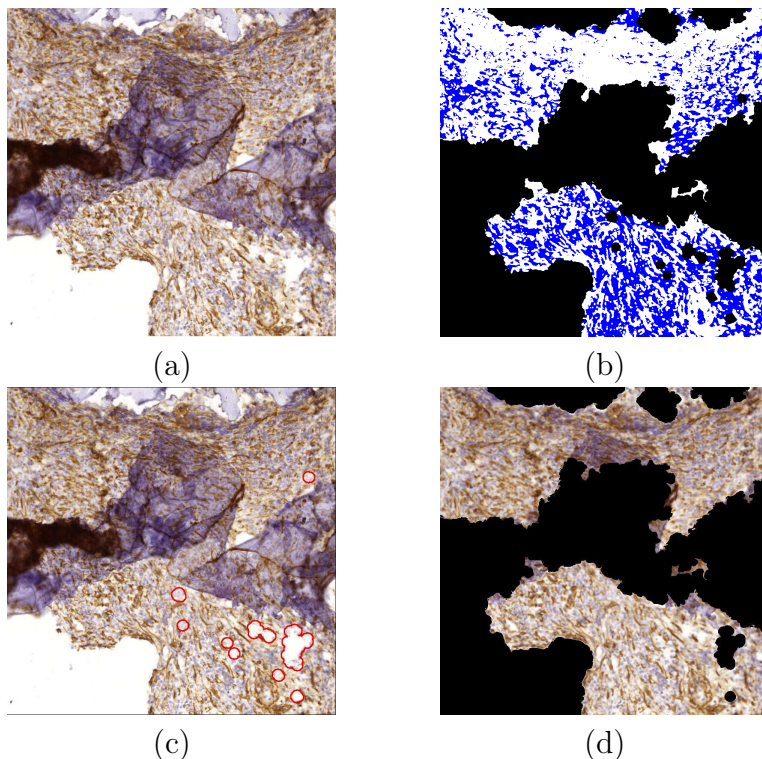
A meghatározott jellemzők alapján a Breiman és társai által fejlesztett CART módszert [14] alkalmaztuk annak eldöntésére, hogy a terület a vérképző állomány részének tekintendő-e, vagy sem. A döntési fa felépítéséhez 40 annotált képet dolgoztunk fel. Az előzőleg ismertetett módon meghatározott E_1 képeken szereplő lyukakat az annotációk alapján soroltuk előtér, illetve háttér osztályokba. A fa mélységét 4 szintben maximáltuk, és a túlzott illeszkedés megakadályozása érdekében elvártuk, hogy minden levélemhez legalább 50 minta kötődjön. A felépítéshez használt halmazra 7.6% a teszt halmazon 8.4% volt a besorolási hiba.

Egyéb struktúrák eltávolítása

Mielőtt a vérképző állomány végleges területére szolgáló képletet megadnánk, érdemes végiggondolni mi történt a korábbi lépések hatására a véralvadékkal borított területeken, illetve a kötőszövet darabokkal.

A véralvadék és a kötőszövet is lokálisan simának tekinthető, ezért általában a csontdetektáló modul által kerülnek eltávolításra. A kötőszövetre jellemző gyűrődések miatt azonban kis darabok

maradhatnak az értékesnek ítélt területben. Máskor olyan gyenge festődést mutatnak, mely alapján a plazmával kerülnek egy kategóriába. Ilyenkor azon részeket detektálja értékesnek a rendszer, mely sejtmagokat (esetleg rostot) is tartalmaz.



32. ábra. Vérvépző állomány értékes részének detektálása: (a) eredeti kép, (b) pozitív részek és sejtmagok uniója fehérrel ($P \cup B$) és a ($p \notin H$ és $K(p) > 0$) feltétnek eleget tevő pontok halmaza kézzel, (c) besorolandó lyukak (H), (d) eredménykép

Az E_1 kép előállításán alkalmazott kiterjesztés természetesen ezekre az álpozitív területekre is hat, ezért a kiterjesztett pontok sem kerülnek bele automatikusan a vérvépző állományba, csak azon pixelek, melyek környezetében elég sok rost vagy sejtmag található.

A vérképző állományt tehát a

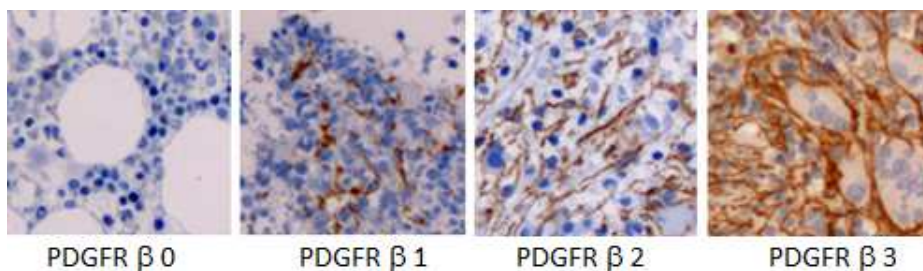
$$U = P \cup B \cup H_f \cup \{p \notin H \text{ és } K(p) > 0\}$$

képlettel határoztuk meg, ahol H az E_1 képen lévő lyukak halmaza, H_f pedig a lyukak előtérhez sorolt pontjainak halmaza (32. ábra).

3.3.8. Jellemzőszámítás

Az orvostudomány területén az egyik legellentmondásosabb helyzet, amikor egy köztudottan folytonosan fejlődő betegségeket diszkrét állapotokba kell besorolni, mesterségesen határt vonva az egészséges és a kóros esetek közt, vagy a kóros minták egyes stádiumai közt.

Bár a kutatás folyamán Bedekovics és társai rámutattak arra, hogy a Gömöri-festéssel kezelt mintáknál használt, morfológiai leíráson alapuló gradálási rendszer [116] adaptálható a PDGFR- β fibroblasztban való expressziójának leírására is [12], a szabályrendszer (6. táblázat, a 33. ábra) helyenként szubjektív elemekkel terhelt.



33. ábra. Grádusrendszer PDGFR- β aktivált fibroblasztban való expressziója alapján [111].

Az automatikus elemző rendszer feladata a grádusokhoz tartozó leírásoknak minél inkább megfelelő, de objektív módon

6. táblázat. Grádusrendszer PDGFR- β aktivált fibroblasztban való expressziója alapján [11]

Grádus	Leírás
0	Nincs szignifikáns mennyiségű pozitivitást mutató sejt.
1	Izoláltan jelentkező pozitivitást mutató sejtek, esetleg azok vékony nyúlványai, melyek elvétve kereszteződnek.
2	Számos pozitivitást mutató sejt, rostos elváltozás figyelhető meg, melyek laza hálózatot alkotnak.
3	Számos pozitivitást mutató sejt, melyek nyúlványai sűrű hálózatot alkotó rostkötegeket hoznak létre.

meghatározható értékek szolgáltatása volt, ezért jelenleg nem szerepelnek hagyományos textúraleírók a számolt paraméterek közt.

A jellemzők számítása alapvetően csempéként történik, majd ezek összegzéséből, összefésüléséből állnak elő a teljes metszetet leíró paraméterek (7. táblázat).

3.3.9. Elemzés megbízhatóságának jellemzése

Az elemzés végeredménye mellett a szakértők számára igen fontos információ, hogy az adott eredményt mennyire lehet megbízhatónak tekinteni. Az alábbiakban azokat az eseteket gyűjtöttük össze, amikor az eredményeket fenntartással kell kezelni. A megbízhatóságra utaló paramétereket a 8. táblázat tartalmazza.

7. táblázat. A vizsgált paraméterek.

Paraméter	Leírás
A_{norm}^+	A pozitivitást mutató terület a vérképző állomány területének arányában.
C_{norm}	A pozitivitást mutató komponensek száma a vérképző állomány területének arányában.
P_{norm}	A pozitivitást mutató komponensek kerületének összege a vérképző állomány területének arányában.
X_{norm}	A pozitivitást mutató komponensek vázában lévő kereszteződések száma.
P_{norm}^W	A pozitivitást mutató komponensek súlyozott kerületének összege a vérképző állomány területének arányában. A súly az alakzat vázában kereszteződési és végpontjai adják.
A_{Top30}^+	A 30 legnagyobb, pozitivitást mutató komponens területének összege.
P_{Top30}	A 30 legnagyobb kerületű, pozitivitást mutató komponens kerületének összege.
S_{Top30}	A 30 leghosszabb vázzal rendelkező, pozitivitást mutató komponens vázhosszának összege. A váz hosszának a vázat alkotó pontok számát tekintettük.

Kevés adat

A biopsziás minta mérete és összetétele is jelentős eltéréseket mutathat. Az utóbbi eltérése hangsúlyosabb, hiszen előfordulhat, hogy a minta mérete teljesen megfelelő, azonban annak jelentős részét csont, kötőszövet és zsír alkotja. Természetesen megbízhatóbbnak tekinthető egy olyan eredmény, ahol több ezer μm^2 -es terület állt rendelkezésre az elemzésnél, mint ahol csak néhány tíz.

8. táblázat. Az eredmény felhasználhatóságára utaló paraméterek

Paraméter	Leírás
A_{roi}	A vérképző állomány területe
N_{used}	Elemzéshez felhasznált csempék száma.
$N_{filtered}$	Az első szűrőn kidobott csempék száma.
$N_{filtered}$	A jellemzőszámítás előtt kidobott csempék száma.
H_{diff}	A csempénkénti A_{norm}^+ maximális és minimális értékének különbsége.
H_{type}	Az A_{norm}^+ csempénkénti értékéből számolt hisztogramának típusa: unimodális-e vagy sem.
D_p	A csempénként számolt p jellemzők szórása, ahol a 7. táblázatbeli normalizált paraméterek egyike.

Festési hiba

A minta előkészítésére, és a festési eljárások végrehajtására vonatkozó protokollok szigorú betartása mellett is előfordul, hogy a festés nem a megszokott módon hat. Amennyiben az egész metszeten gyengébben vagy erősebben hatott a festés, akkor a mintát nem tekintjük hibásnak, ha viszont csak bizonyos részeket érint a változás, az erősen torzíthatja a végeredményt. Ez a fajta probléma tipikusan akkor lép fel, amikor a minta bizonyos részei valami miatt kiszáradtak. A kiszáradt részeken a hematoxin festés általában gyengébben, a DAB pedig egyáltalán nem hat (34. ábra), ami diagnosztikai szempontból veszélyes helyzetet eredményez, hiszen kevésbé kórosnak érzékeljük miatta az adott metszetet.

A kiszáradt minta felismeréséhez a csempénkénti eredményeket vesszük alapul, egész pontosan a pozitivitást mutató és a hasznos terület hányadosaként előálló értékekből számolt hisztogram alakját használjuk fel a probléma észlelésére, mely a normálisan festődött metszeteknél unimodális, míg a rosszul festődött metszeteknél



34. ábra. Festési hibás metszet. Láthatóan a DAB festés csak a metszet belső területeire hatott, melyet minden bizonnyal a metszet szélének kiszáradása okozott.

tipikusan bimodális.

Az ilyen jellegű metszetekhez az egész metszetre vonatkozó paraméterek mellett, csak a magasabb pozitivitást mutató csempékre is megadjuk azok értékét, azonban ennek felhasználásáról, esetleges új festés igényléséről mindenképpen szakértőnek kell döntenie.

Kiugró értékek

A kiugró értékeket legtöbbször olyan ártalmatlan jelenségek okozzák, mint egy nagyobb, keresztben elmetszett ér, rosszul előkészített minta, véletlenül beszkenelt rögzítőelem, vagy egy hibásan felismert izomdarabka. A szakértő munkájának megkönnyítése érdekében minden leíró paraméteréhez készül egy bélyegkép is, mely az egyes csempékre számolt értékeket mutatja hőtérszűrően. A megfelelő csempére kattintva megjeleníthető az elemzett terület, a vérképzőállomány és a pozitivitást mutató részek is, így könnyen ellenőrizhetővé válik egy-egy gyanús érték oka.

3.4. Képfeldolgozó algoritmus kiértékelése

A teljes algoritmus és ezen belül a csontgerendák eltávolítására szolgáló rész kiértékelése is kézi annotációkkal való összevetés alapján történt. Az annotálást egy jelölő végezte szakértő irányítása mellett. A szenzitivitást, specificitást, precizitást és pontosságot a 2.6. fejezetében megadott (2)-es képletek alapján számoltuk.

3.4.1. Csontgerendák eltávolítása

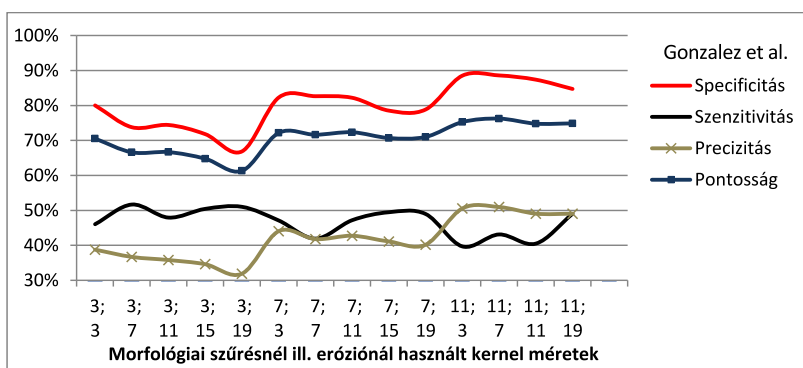
A csontgerendák detektálására szolgáló eljárások vizsgálatához 40 darab olyan 768×768 -as méretű képet használtunk fel, melyben a vérképző állományon kívül csak háttér, zsírsejtek és csontgerenda darabok fordultak elő. A minták egy része viszont rostos elváltozást mutatott.

A módszerünket Gonzalez és társai későbbi munkájával [42] vetettük össze, mely a korábban ismertetett eljárások közül az egyetlen, mely teljesen automatikus, és nem használja ki a specifikus festés tulajdonságait, ezért változtatás nélkül tesztelhető. Valamint összehasonlítottuk Shi és társai módszerével [97] is, azonban ennél az eljárásnál a festék felbontására irányuló lépést kicseréltük arra, mely a saját módszerünkben is szerepel.

Bár a tesztek 1:8-as és 1:16-os felbontás mellett is elvégeztük, utóbbi esetben minden algoritmus elfogadhatatlanul gyengén teljesített, ezért itt csak az 1:8-as nagyításra vonatkozó eredményeket adjuk meg.

A különböző paraméterek mellett adott eredmények, egészen pontosan a releváns részletek, a 35., 36. és a 37. ábrákon láthatók.

Összességében Gonzalez és társai által bemutatott módszer teljesített a leggyengébben, melynek okát abban látjuk, hogy az első

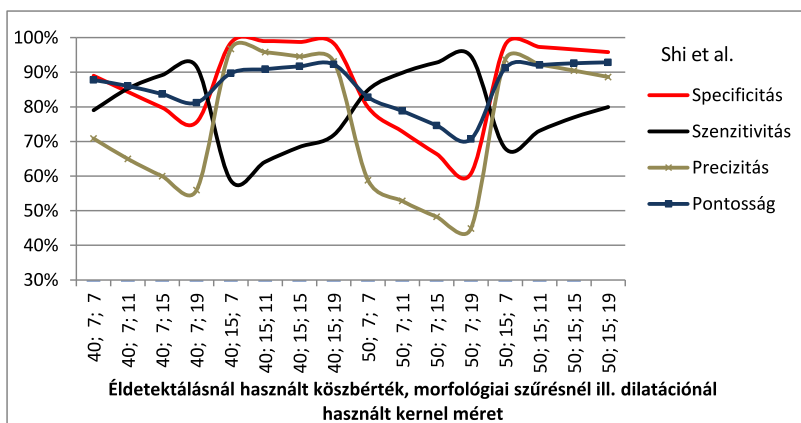


35. ábra. Gonzalez és társai által publikált algoritmus [42] eredményi különböző paraméterezés mellett

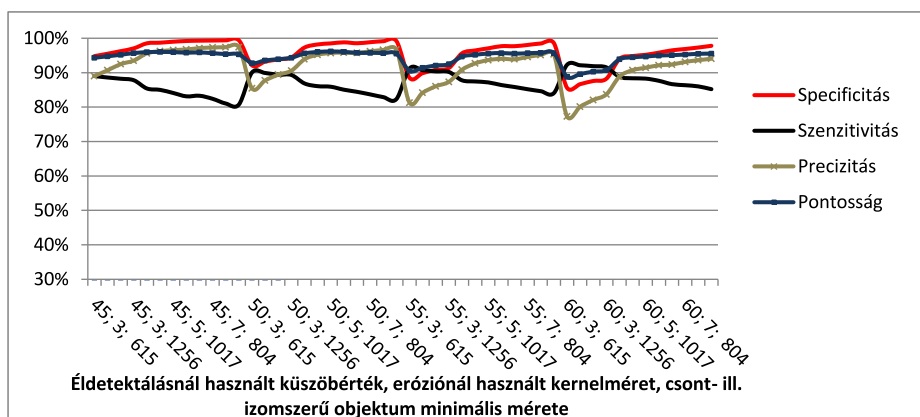
körben alkalmazott szegmentáció után a komponensek szórása és intenzitásértéke alapján sorolják be azokat osztályokba. A szegmentálás viszont a vérképzőállomány területein belül is viszonylag homogén régiókat hoz létre, az intenzitás önmagában pedig nem elegendő a besoroláshoz. A rostosodást mutató mintákon fokozottabban jelentkezik a probléma, mert az első lépés után keletkezett szegmensek átlagos mérete csökken.

Shi és társai módszere (festés felbontás kicserélésével), megfelelő paraméterbeállítások mellett, már elfogadhatóbb eredményt nyújt. A módszer problémás lépése, hogy a nem csont objektumok eltávolítását morfológiai szűréssel oldja meg, mely természetesen a megmaradó csontokra is kihat. Bár a szerzők egy dilatációs lépéssel igyekeznek helyreállítani a csontgerendákat, ez önmagában nem eredményez megfelelő rekonstrukciót. Mindenesetre a morfológiai szűrésnél és dilatációnál használt kernelek méretének helyes megválasztása kulcsfontosságú a megfelelő eredmény érdekében.

Az általunk javasolt megoldás nagyrészt kiküszöböli az előbb említett hátrányokat. Természetesen a különböző paraméterek megválasztása továbbra is befolyásolja a módszer eredményességét,



36. ábra. Shi és társai által publikált algoritmus [97] eredményi különböző paraméterezés mellett



37. ábra. Az általunk javasolt módszer eredményei különböző paraméterezés mellett

de hatásuk mérsékeltnek nevezhető Shi és társai módszeréhez képest.

3.4.2. Vérképző állomány detektálása

Az eredmények értékelését 400 olyan annotált képen végeztük el, melyeket a fejlesztés során nem használtunk fel (sem a csontdetektáló paramétereinek megválasztásánál, sem más rész tanításánál). A minták közül 250 véletlenszerűen lett kiválasztva, további 150 úgy, hogy a ritkábban előforduló szövettípusok, és egyéb nem odailő elemek is megjelenjenek. Minden kép mérete 756×756 pixel volt.

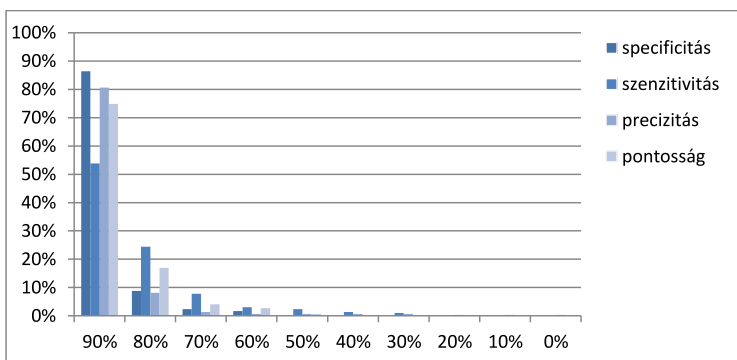
Az összesített eredményeket a 9. táblázat tartalmazza. A táblázat első sorában azon minták is szerepelnek, melyek nem vesznek részt a végső jellemzőszámításban, mert a csont- és izomdetektálás után a képméret 10 százaléka alá esett vissza a hasznos terület (22. ábra). A táblázat második sora tartalmazza azon csempékre vonatkozó eredményt, melyek ténylegesen felhasználásra kerültek, a harmadik sor pedig a nem felhasznált csempéken elért eredményeket tartalmazza. A számszerű eredmények természetesen utóbbi esetben gyengébbek, hiszen ezen mintákon annyira kevés a vérképzőállomány, hogy egy-egy kisebb detektálási hiba is lerontja az eredményt.

9. táblázat. A vérképzőállomány detektálásának értékelése

	specificitás	szenzitivitás	precizitás	pontosság
összes csempe	95,59%	86,43%	92,31%	92,61%
felhasznált csempe	95,56%	87,58%	93,99%	91,93%
nem felhasznált csempe	97,77%	71,25%	70,57%	95,62%

A 38. ábra részletesebb képet ad a megbízhatóságról, megmutatva a feldolgozott minták hány százaléka esett a különböző megbízhatósági kategóriákba.

A bemutatott eljáráshoz implementálása C++ nyelven történt meg OpenCV függvénykönyvtár [52] felhasználásával. A sebesség mérését Intel^(R) CoreTM i7-2630QM CPU-val és 8GB memóriával rendelkező



38. ábra. Vértképzőállomány detektálásának értékelése. A függőleges tengelyen mért érték azt mutatja, hogy a jellemzőszámítás során felhasznált cseppek hány százalékánál volt a specificitás, szenzitivitás, precizitás és a pontosság nagyobb vagy egyenlő a vízszintes tengelyen látott értéknél.

notebookon, Windows 8.1 Enterprise 64 bites operációs rendszer alatt végeztük. A teljes metszetek feldolgozása néhány (1-5) percet vett igénybe. A konkrét értéket leginkább az előszűrőn átjutott, vagyis a ténylegesen feldolgozandó cseppek elemzési ideje határozza meg, mely a mérések szerint átlagosan 0,83 másodperc.

4. Sávós szitakötőszárnyak morfológiai vizsgálatánál alkalmazott bélyegek automatikus meghatározása

A témában járatlan olvasó számára talán biológusok hóbortjának tűnhet egy szitakötőkkel kapcsolatos kutatás, ám ezen élőlények több szempontból is figyelemre méltóak. Számos kutatás irányul a kifejlett egyedek szárnyának mechanikai vizsgálatára és aerodinamikai elemzésére, mivel a négy egymástól teljesen függetlenül mozgatható hártvány szárny segítségével a szitakötők bármilyen irányban képesek repülni [55]. Kicsi agyméretük ellenére rendkívül fejlett vizuális képességekkel bírnak, a nagyméretű összetett szemekhez az emberéhez hasonló szelektív figyelem társul [122].

Az említett képességek az állatvilág leghatékonyabb ragadozói közé emelik a szitakötőket. Levegőben közel 95%-os hatékonysággal képesek elejteni a kiszemelt zsákmányt és egy órán belül akár testsúlyuk duplájának megfelelő táplálékmennyiséget is képesek elfogyasztani [43]. Falánkságuk miatt igen jelentős szerepet játszanak az ökoszisztéma fenntartásában. Az életterükben bekövetkezett változásokra viszont olyannyira érzékenyek, hogy egy adott területen előforduló szitakötők egyedszáma és faji, alfaji összetétele akár a víz- és környezetminőség számszerű leírójaként is szolgálhat [36].

A Debreceni Egyetem Hidrobiológiai Tanszékén végzett kutatások elsősorban az utóbbi területre, illetve az ehhez szorosan kapcsolódó faunaáramlásra, faji, alfaji tagozódással (taxonómia) kapcsolatos kérdésekre, valamint a populációk méretét befolyásoló tényezők feltárására koncentrálnak.

Együttműködés a *Calopteryx splendens*, vagyis a Sávós szitakötővel kapcsolatos taxonómiai kutatásnál alakult ki, melynek keretében egy

olyan szoftver fejlesztését tűztük ki célul, ami elősegíti az imágók (teljesen kifejlett szitakötők) szárnyának morfológiai elemzését a vizsgálatnál használt adatok automatikus meghatározásával.

A következő fejezetben áttekintést adunk a szitakötő, illetve egyéb rovarszárnyak elemzésével foglalkozó módszerekről, szoftvekről. Majd a kutatás során használt anyagok és az általunk kidolgozott algoritmus kerül bemutatásra, mely a [112]-ban publikált módszer továbbfejlesztése. Végezetül az elért eredményeket ismertetjük.

Az értekezésben nem térünk ki a gyűjtés részleteire és a statisztikai vizsgálatokra, melyek Szalay Petra Éva doktorjelölt munkáját képezték. Az említett részek a következő publikációkból megismerhetők: [107, 108].

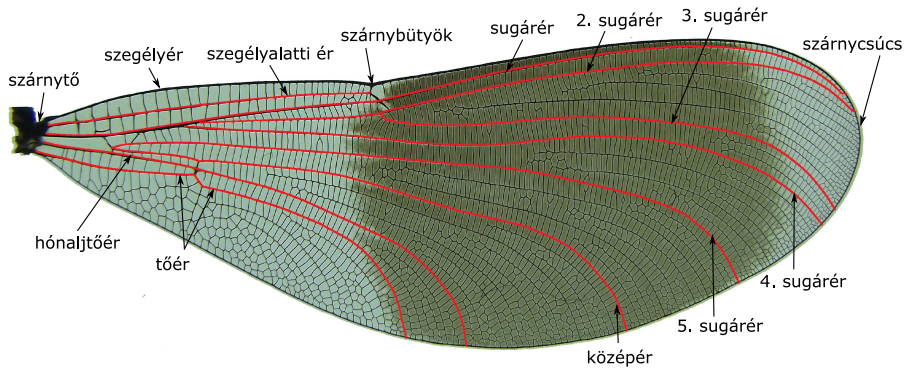
4.1. Irodalmi áttekintés

A *Calopteryx splendens* különféle alfajai a világ számos részén előfordulnak Nyugat-Európától kezdve az oroszországi Bajkál-tó partjáig, de még Ázsia északi részén is megtalálhatóak [6].

Míg Európa egyes részén már tisztázott, hogy mely alfajok fordulnak elő, Európa középső és déli részén, így a Kárpát-medencében is, kérdéses a taxonómiai tagozódás [32, 46, 91, 92].

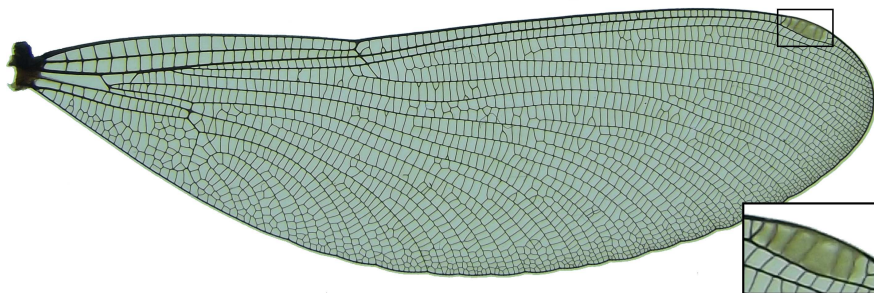
Az alfajok megkülönböztetésére külső jegyeket, úgynevezett bélyegeket szokás használni. Színes szárnyú szitakötőkről lévén szó, hím imágóknál bevett módszer a szárnyfolt kiterjedésének és pozíciójának használata [6, 33, 35], illetve egyéb strukturális jegyeknek, mint például bizonyos erek kezdő és végpontjának távolsága, vagy meghatározott szárnysejtek (az erek által közbezárt terület) méretének a vizsgálata [1]. A szárnyalak leírásánál rendre szerepet kap a szárnytő, a szárnybütyök, és szárnycsúcs is, de a

fontosabb erek (39. ábra) szegélyérrel való metszéspontjai is szerepet kaphatnak a szárny alakjának jellemzése során [91].



39. ábra. *Calopteryx splendens* szárnyának főbb erei (pirossal jelölve) és néhány fontosabb pont

A strukturális bélyegek nőstény egyedeknél is hasonlóak. A szárnyfolt helyett pedig az úgynevezett álszárnyjegy (40. ábra) használható [6]. A szárnyak vizsgálatán túl számos szerző javasolja a fej, tor és az utótori haslemez mintázatának vizsgálatát is [1], ezek részletezésétől azonban itt eltekintünk.



40. ábra. *Calopteryx splendens* nőstény álszárnyjegy

A morfometriai vizsgálatokhoz ma már általában a szárnyról készült nagy felbontású fénykép vagy a szárny scannelt változata nyújtja az

alapot, és az adatok elemzése is számítógépes szoftverek, statisztikai programok, illetve általános célú morfolometriai szoftverek segítségével történik [28, 86]. Az elemzéshez szükséges bélyegek kijelölése és a köztük lévő kapcsolatok megadása viszont jellemzően ma is a felhasználó feladata. Mivel a taxonómiai besorolás alapjául többnyire könnyen felismerhető pontok szolgálnak, ezért mérések a bélyegek manuális jelölése ellenére is reprodukálhatók. A szitakötők szárnyfoltja és a szárny egyéb területei között viszont gyakran nincs éles határ, ezért a humán jelölők által megadott körvonalak jelentősen eltérhetnek egymástól. Ezt felismerve Mertens és társai az 1990-es években képfeldolgozásra épülő eljárást dolgoztak ki [74]. A szárnyakat fekete-fehér kamerával, standardizált megvilágítási körülmények között digitalizálták. A kapott képeken a folt és az érhálózat fekete, minden más fehér színű. A szerzők ezután hosszanti irányban azonos szélességű szeletekre osztották a szárnyat, minden szelethez hozzárendelve a fekete és fehér pontok arányát. A folt kezdetét és végét az egymás melletti szeletekhez tartozó értékek hirtelen változása alapján határozták meg.

A jellegzetes pontok automatikus meghatározása elsősorban a nagy egyedszámmal zajló vizsgálatoknál fontos. Számos kutatásban került felhasználásra Houle és társai által fejlesztett *WINGMACHINE* [48], mely gyümölcslegyek (*Drosophila*) szárnyának analizálására szolgál. A szoftver által használt algoritmus első lépései, a szürkeskálás kép invertálása, mediánszűrés és morfológiai nyitás, az erek detektálását készítik elő, mely automatikus két szintre vágással történik. Majd a kisebb lyukak feltöltése után vázkijelölés következik. A rövid, zajnak tekintett szakaszok és a fontos kereszteződési pontok meghatározása után a program lényegi része, egy előre meghatározott érhálózatmodell illesztése következik. A modellben 12 jellemzőpont van, az ereket pedig B-spline görbék reprezentálják. Minden érszakasz illesztése külön-külön történik a Lu and Milios által kidolgozott eljárás alapján [68].

Bár nem kimondottan elemzőszoftver, a Tofilski által fejlesztett, rovarszárnyak diagramjának készítésére szolgáló DrawWing programot [117] is több kutatásnál alkalmazták már sikeresen, ugyanis a rajzoláshoz használt csatlakozási pontok sok rovarszárny esetben azonosak az elemzésnél használt pontokkal. A szárny és azon belül az erek kiemelésére is az intenzitáshisztogram alakja alapján végzett küszöböléssel történik, melyet Houle és társai munkájához hasonlóan vázkijelölés és a váz tisztítása követ. A jellemző pontok a váz csatlakozási pontjai közül kerülnek kiválasztásra, egy előre megadott modell alapján.

A teszteléshez erdei (*Dolichovespula sylvertis*) és szász darázs (*Dolichovespula saxonica*) egyedek képei mellett a szitakötők rendjébe tartozó fatörzsvadász acsák (*Aeshna juncea*) képét is felhasználta a szerző. A letölthető változatba azonban az acsákhoz tartozó modell már bele sem került. Szitakötők esetében nem működik megfelelően a program.

Megemlíthető még Steinhage és társai méhfélék *Apidae* automatikus genusba sorolására alkalmas módszere [103] is, melyhez a szárnyakról készült mikroszkópos képeken detektált szárnysejtek szolgáltatják az alapot. A szárnysejtek detektálása az erezet DoG (Difference of Gaussian) operátorral való kiemelésével kezdődik. Az élpontok összekötése során pedig olyan a-priori információkat is felhasználnak a szerzők, mint hogy bármely sejt ötszög alakú.

Összességében elmondható, hogy a rovarszárnyak elemzésére szolgáló jelenlegi módszerek erősen építenek arra, hogy a vizsgált rovarok szárnyai kevés szárnysejtből épülnek fel és a fontosabb csatlakozási pontok és a vázkijelöléssel kapott kereszteződési pontok lényegében azonosak, mely a modell alapú eljárásoknak kedvez. A *Calopteryx splendens* sűrű érhálózata azonban több száz szárnysejtre osztja fel a szárnyat, ráadásul a sejtek száma, sőt még a főbb erek közt megjelenő hosszanti erek száma is egyedenként változhat, ezért az érhálózat mintáját tekintve sokkal nagyobb diverzitással kell számolni, mint a fullánkosak vagy a

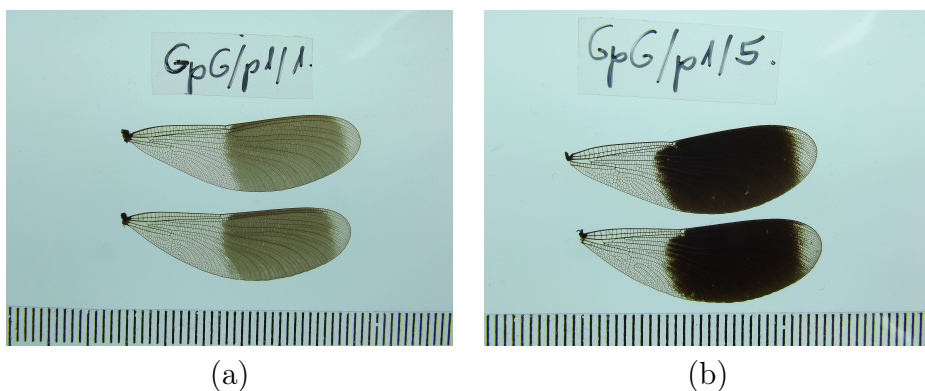
gyümölcslegyek esetében.

4.2. Felhasznált anyagok

A szoftver kialakításához és teszteléséhez a Hidrobiológiai Tanszék 30 nőstény és 179 hím imágóról készült felvételt bocsájtott a rendelkezésünkre, melyek közül az ép elülső szárnyat tartalmazó felvételeket dolgoztuk fel (141 hím, 26 nőstény). Az egyedek több különböző gyűjtésből származtak, melyek közül a Konyári Kálló Hosszúpályi szakaszánál történt gyűjtés populációs mintának számít, míg a többi gyűjtésnél lényeges szempont volt, hogy változatos egyedek kerüljenek befogásra. A további részletek megtalálhatók a [107, 108] publikációkban.

A fényképezés előkészítéséhez a jobb oldali szárnyak leválasztásra kerültek a szitakötő törzséről majd óvatos szárításon estek át, mely a szitakötők konzerválásához használt etil-alkohol okozta esetleges csillogást hivatott kiküszöbölni.

A szárítás után a szárnyak egy üveglapra lettek helyezve egy az egyedre utaló címke és egy referenciaként használt vonalzó közé. A fényképeken az elülső szárny került felülre (41. ábra). Az érhálózat kiemelését alulról történő megvilágítás segítette. A 4288×3216-os felbontású CCD képek egy Fujifilm Finepix S2950-es fényképezőgéppel készültek. Sajnos a használt eszköz a RAW formátumot nem támogatta, ezért a képek JPG formátumban (minőség=100, tömörítési arány: 7 : 1 – 10 : 1) kerültek rögzítésre. A képelemzés szempontjából ez természetesen nem előnyös, azonban a szárnyak újrafotózására nem volt mód, mert a szárítást követően a szárnyak annyira érzékenyek, hogy jelentős részük eltörik a fényképezési eljárás során.



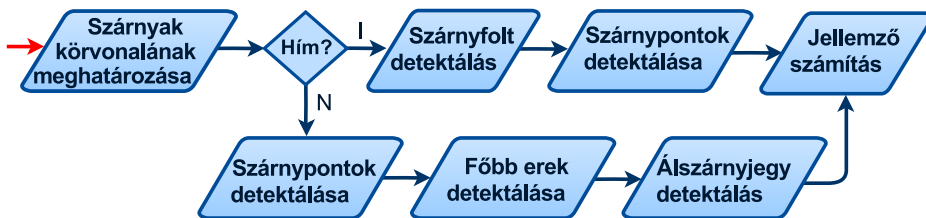
41. ábra. A szárnyak felvételkészítésénél használt elrendezése. Az (a) ábra egy fiatal, a (b) egy idős hím egyedről készült.

4.3. Automatikus képelemzés

Az elemzés a nőstények és a hím imágók esetén is a szárnyak körvonalának meghatározásával kezdődik, melyet a fontosabb pontok, a szárnytő, a szárnybütyök, és a szárnycsúcs detektálása követ. A hím egyedeknél a következő lépésben megtörténik a szárnyfolt körvonalának meghatározása is. Majd a nőstény egyedek esetében a a mérések során használt erek azonosítására is sor kerül, melyet az álszárnyjegy detektálása követ. A folyamat hímek és nőstények esetében is a meghatározott adatokból származtatható jellemzők számításával zárul (42. ábra). Megjegyezzük, hogy az egyed nemének meghatározása nem része az eljárásnak, az a fajlénv alapján minden esetben ismert volt.

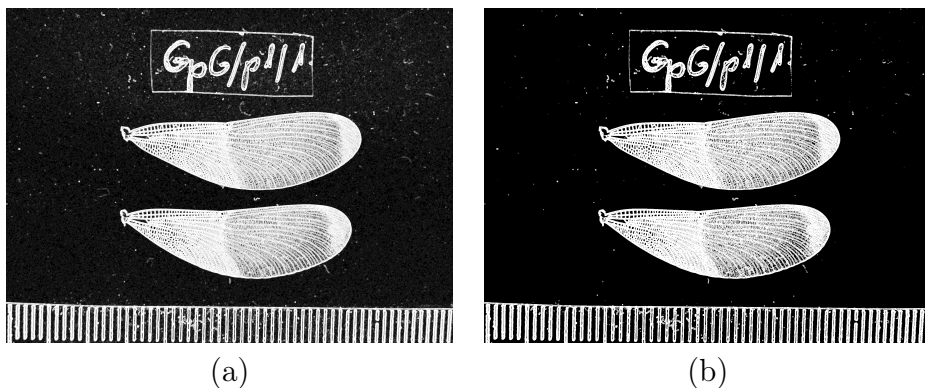
4.3.1. Szárnyak körvonalának meghatározása

A körvonal detektálásánál a szegélyér és a háttér találkozásánál lévő intenzitásváltozást használjuk ki, melynek számszerűsítéséhez Sobel operátort alkalmazunk a képre [100]. A élerősséget szokásosnak



42. ábra. A szárnyelemzés főbb lépései

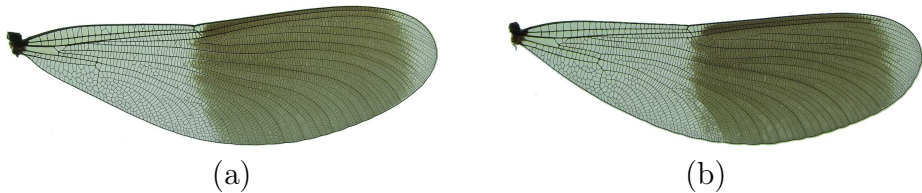
nevezhető módon a vízszintes ill. függőleges irányú élerősség abszolútértékek tekintettük, majd a hamis élpontok elnyomásához küszöbölést alkalmaztunk (43. ábra). A küszöbértéket paraméterként adtuk meg, hiszen a felvét elkészítés körülményei lehetővé tették, hogy minden képnél azonos határt használjunk. A szegélyér és a tárgylemez határán lévő intenzitásváltozás erőssége miatt pedig a kisebb megvilágítási egyenetlenségek sem jelentettek problémát.



43. ábra. A 41.a ábrán látható felvétel gradienserősség-képe (a) és élképe (b).

Az élpontok meghatározását követően a két legnagyobb területű, a kép szélével nem érintkező objektumot tekintjük szárnyaknak. A két kiválasztott objektumon lyukfeltöltést végzünk, majd a két szárnyat

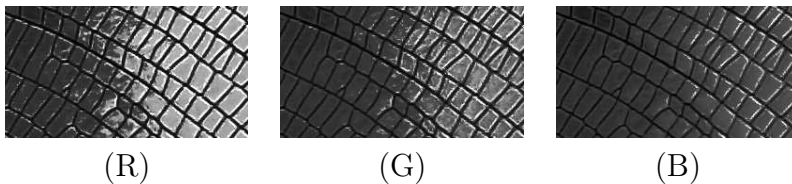
két külön képre másoljuk (44.a ábra). A további lépéseket mindkét szárnyra függetlenül el lehet végezni. A kézi mérések esetében a jobb elülső szárnyra vonatkozó adatokat szokás megadni, mely a különböző kutatások adatainak összevethetősége érdekében alakult ki.



44. ábra. A 41.a ábrán látható felvételtől kinyert elülső (a) illetve hátulsó (b) szárny

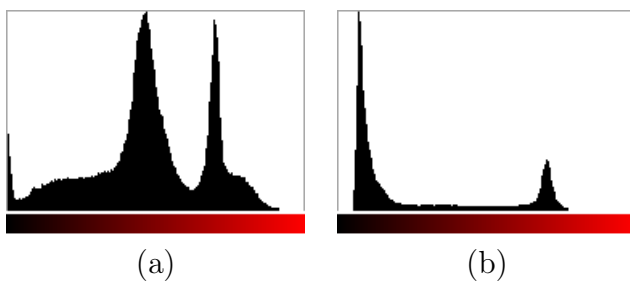
4.3.2. Szárnyfolt detektálása hím egyedeknél

A folt detektálásához az RGB kép vörös csatornáját használjuk, mivel ezen a csatornán a folt jobban elüt a kékes-zöld háttértől, mely a szitakötőszárny áttetsző szárnysejtjei mögött is látható (45. ábra).



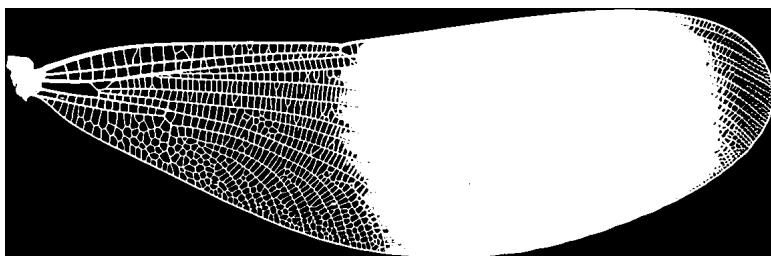
45. ábra. Szárnyfolt szélét tartalmazó RGB kép egyes csatornái.

A hím imágóknál a szárnyfolt színe az életkor előrehaladtával folyamatosan sötétedik. Míg a fiatal egyedeknél szinte teljesen elkülönül a sötét érhálózat és a szárnyfolt intenzitástartománya, az idős példányoknál teljesen el is tűnhet a különbség, ahogy azt a 46. ábrán látható hisztogramokon is megfigyelhetjük.



46. ábra. A 41. ábrán látható fiatal (a) és idős (b) egyed szárnyáról készült felvétel vörös csatornájának hisztogramja

Az egyedek azonos módon történő kezelése érdekében három szintű Otsu módszerrel [67] határoztuk meg az „ideális” küszöbértékeket. A felső határtól kisebb intenzitású, szárnyon belüli pixeleket tekintettük előtérnek, a többi pixelt háttérnek. Az így kapott kép fiatal és idős egyedeknél is a szárnyfoltot és az érhálózatot tartalmazza (47. ábra).



47. ábra. A 44.a ábrán látható szárnyra alkalmazott küszöbölés eredménye.

Az erek eltávolításához eróziót alkalmazunk (48.a ábra), majd a legnagyobb objektumot, a foltot rekonstruáljuk, melyhez a kapott képet kis mértékben „túldilatáljuk” és a foltot és érhálózatot tartalmazó kép közt pontonkénti és műveletet végzünk (47.b ábra). A eróziónál használt maszkméret úgy választottuk meg, hogy az a szegélyeret is el tudja távolítani. A használt felbontás mellett erre

egy 5×7 -es ellipszis alakú struktúraelem elegendő. A dilatació 9×11 -es, szintén ellipszis alakú szerkesztőelemmel történt.



48. ábra. A 47.a ábrán látható képre alkalmazott erózió eredménye (a) és a szárnyfolt maszkja (b).

4.3.3. Felső szárnytőpont detektálása

A szárny törzsről való leválasztásakor a szárny teljes épségben való megőrzése az elsődleges cél, ezért szinte mindig marad egy kis törzshöz tartozó rész is a szárny tövénél, amit a további elemzés előtt el kell távolítani.

Megfigyelhető, hogy a hímek szárnyfoltjának kiemelésére használt küszöbölés a szárnytőhöz tartozó pixeleket is az előtérponthoz sorolja, és az érhálózat eltávolítása után a folt mellett a szárnytő is visszamarad (48.a ábra). Illetve nőstények esetén csak ez a rész marad meg a képen, így nincs más teendők, mint ezen objektum legmélyebb „völgypontotját” meghatározni.

Technikailag ezt az objektum északi részének körvonalára illesztett konvex burok segítségével oldjuk meg. A körvonal és a konvex burok egymást követő érintkezési pontjai összetartozó szakaszokra osztják a körvonalat (c) és a konvex burkot ($H(c)$) is. Az így kapott szakaszpárokra meghatározzuk a maximális távolságot a

$$\max \left(\min_{p \in c, q \in H(c)} (d(p, q)) \right)$$

képlet alapján, ahol $d(p, q)$ a p és q pont közt mért Euklideszi távolságot jelöli.

Szárnytőpontnak a legnagyobb értékkel rendelkező szakasz azon pontját tekintjük, amelyhez a maximális távolság tartozik (49. ábra).



(a)



(b)

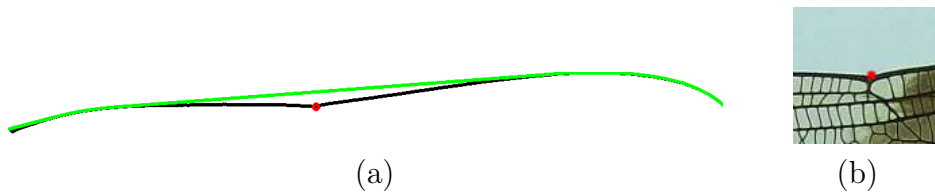
49. ábra. Szárnytőpont detektálás folyamata (a) és eredménye (b) a 44.a ábrán látható szárnyon. Az (a) ábrán fekete színnel a korábban detektált szárnytő körüli rész körvonala, zöld színnel annak konvex burka, pirossal a szárnytő felső szakaszán lévő „völgy-pontok” láthatók. A (b) ábrán pirossal jelölve a konvex buroktól legtávolabb eső völgypont.

4.3.4. Szárnybütyök detektálása

A *szárnybütyök* a szegélyér felső részét két részre osztó, homorú bemélyedésnél lévő pont. A detektálását a szárnytőpontnál megadott eljárás szerint végezzük, objektumnak a szárnymaszk szárnybütyöktől jobbra eső részét tekintve (50. ábra).

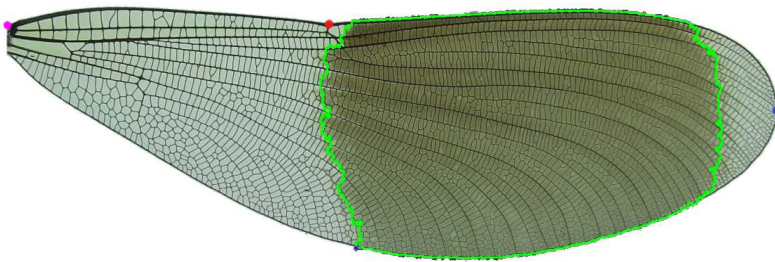
4.3.5. Szárnycsúcs detektálása

A *szárnycsúcs* a szitakötő szárnyának szárnytőtől átellenes oldalán helyezkedik el. A jól meghatározható szárnytő és szárnybütyök



50. ábra. Szárnybütyökdetektálás folyamata (a) és eredménye (b) a 44.a ábrán látható szárnyon. Az (a) ábrán fekete színnel a szegélyér, zöld színnel a konvex burkának szegélyér feletti része, pirossal a szegélyér vizsgált részének konvex buroktól legtávolabb eső pontja.

pontokkal ellentétben a szárnycsúcs egy mesterségesen kijelölt pont a szegélyéren. Annak érdekében, hogy a szárnycsúcs ne függjön a szárny fényképezésnél használt állásától, a szárnyakat elforgatjuk a szárnytőpont körül úgy, hogy a szárnytő és a szárnybütyök y koordinátája a forgatás után azonos legyen. Szárnycsúcspontnak a maximális x koordinátával rendelkező pontok közül az y koordináta szerinti rendezésben középen elhelyezkedő pontot tekintjük (51. ábra).

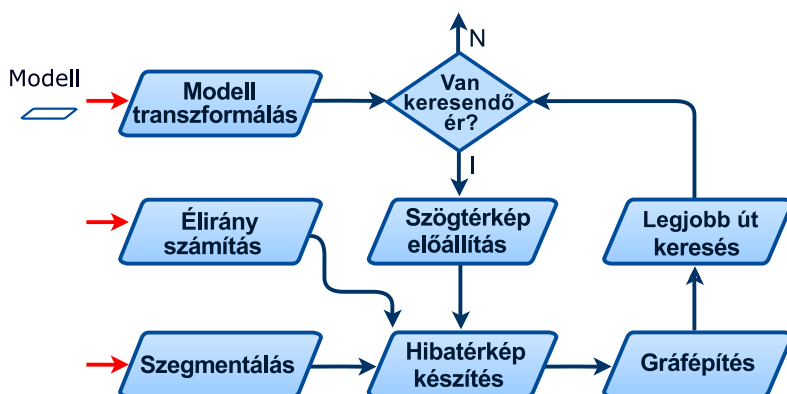


51. ábra. A 44.a ábrán látható szárnyon detektált szárnytő (rózsaszín), szárnybütyök (piros) és szárnytőpont (kék), valamint a folt körvonala (zöld).

Az elemzés további lépéseinél az elforgatott szárnyat használjuk.

4.3.6. Erek detektálása és azonosítása

Az erek detektálásának folyamata a 52. ábrán tekinthető át. Az algoritmus első lépéseként egy modell érhálózatot igazítunk a vizsgált szárnyat tartalmazó képre, a szárnyat tartalmazó kép vörös csatornáját szegmentálásával kinyerjük az érhálózatot, valamint minden pontra meghatározzuk a domináns élírányt. A további lépéseket már erenként hajtjuk végre, az erek sorszámának megfelelő sorrendben. A modell alapján leszűkítjük a képen a keresési területet a vizsgált érnél szöba jöhető részekre, majd egy hibatérképet állítunk elő a kiemelt érhálózat, a domináns élírány illetve a modell ér irányának felhasználásával. A vizsgált területen belül rövid szakaszok sorozatából egy egyszerű, súlyozott irányított gráfot építünk és a kezdő és végpontok közti legkisebb költségű utat tekintjük érnek.



52. ábra. A fontosabb erek meghatározásának főbb lépései

Modell

A modellt egy kézi jelölésű érhálózat alapján állítottuk elő. A jelölés egy az előzőekben leírt módszerrel előkészített képen történt, tehát

a szárnytő és a szárnybütők pontok y koordinátái azonosak. A modell a szárnytő, a szárnybütők pontokat és a detektálandó ereket, valamint azok sorszámát tartalmazza. Az erek számozása mindig a legfelső értől halad folytonosan a legalsó érig.

Az erek pontjainak tárolása a felső szegélyértől mért távolság és az adott x koordinátán mért szárny szélesség hányadosát használtuk, vagyis egy p pont koordinátái helyett a

$$\left(p_x, \frac{p_y - u(p_x)}{l(p_x) - u(p_x)} \right)$$

rendezett pár kerül tárolásra, ahol $u(x)$ a szegélyér x koordinátájához tartozó legkisebb y , $l(x)$ pedig a legnagyobb y koordinátát adja meg.

Modell transzformálása

Ahhoz, hogy a modell megfelelően írhasa le az elemzendő képen lévő erek irányát, a modellbeli és a vizsgált képen detektált szárnybütők pontnak egybe kell esnie, ugyanis több ér is irányt változtat a szárnybütők alatt, illetve a közeléből indul a 3. sugárér, és alatta ér véget a szegély alatti ér. Szintén lényeges a szárnytőpontok egybeesése, mert enélkül a modellbeli erek kezdőpontjai nem illeszkednének kellő mértékben a képen lévő erek kezdőpontjaihoz. Ugyanakkor a modell teljes méretének igazodnia kell a szárny teljes méretéhez is.

Az említett szempontokat figyelembe véve egy (m_x, m_r) modellbeli rendezett pár q képét a

$$q_x = \begin{cases} s_b \cdot m_x + t_x, & \text{ha } n_x^M > m_x, \\ s_b \cdot n_x^M + s_a(m_x - n_x^M) + t_x, & \text{egyébként,} \end{cases}$$

és

$$q_y = u(q_x) + m_r(l(q_x) - u(q_x))$$

képlettel határoztuk meg, ahol

$$t_x = b_x - b_x^M$$

a modellpontok eltolása,

$$s_b = \frac{n_x - b_x}{n_x^M - b_x^M} \quad \text{és} \quad s_a = \frac{W - n_x}{W^M - n_x^M}$$

pedig az x koordináta szerinti, szárnybütyök előtti, illetve utáni rész átskálázáshoz használt együtthatók. A képletben n a szárnybütyköt, b a szárnytőpontot, W pedig a szárny befoglaló téglalapjának szélességét jelöli. Az M felső indexszel ellátott változatok ezek modellbeli megfelelői.

Szögtérkép előállítás

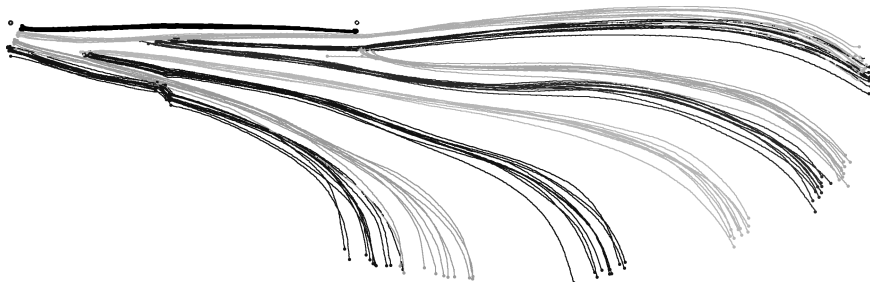
A szögtérképet, mely a (felső) szárnyat tartalmazó képpel azonos méretű, az aktuálisan keresett érnek megfelelő modellbeli ér alapján készítjük el. A modellér egy adott pontjában a szöget a pontot r -el megelőző és r -el meghaladó pont által leírt szakasz x tengellyel bezárt szöge adja. (Az r paraméter értékét úgy állítottuk be, hogy a kapott szakaszok még az erek elvékonyodott részein is az erekben belül haladjanak. Az adott felbontásnál 10-es értéket használtunk.)

A szögtérkép (M_α) minden p pontjához a ponthoz legközelebb eső modellér pont szögét rendeltük, tehát

$$M_\alpha(p) = \begin{cases} \alpha(\arg \min_{q \in L} (d(p, q))), & \text{ha } d(p, q) < D_L(q), \\ \infty, & \text{különben,} \end{cases}$$

ahol $d(p, q)$ a p és q pontok távolságát jelölik. A távolság közelítésére Chamfer módszer alkalmaztunk, oldal, illetve függőleges irányú lépésnél 3-as, átlósnál 4-es súlyt használva [93]. A

$D_L(q)$ paraméter a vizsgált ér keresési tartományának szabályozására szolgál. A kézi jelölési modellek alapján elmondható, hogy a középér, tőér és hónaljtóér formája változatosabb, mint a sugárereké, illetve az is megállapítható, hogy az erek kezdeti szakasza jobban leírható a modell által (53. ábra), ezért a $D_L(q)$ értékét erenként érdemes meghatározni, oly módon, hogy az érponatok vége felé növekedjen annak értéke.



53. ábra. Néhány szitakötőszárny hosszanti erei egy képre másolva, átskálázást követően

Élirány számítás

A domináns élirány meghatározását egy 1D-s, $r/3$ paraméterű Gauss kernel elfogatottjaiból előállított szűrősorozat segítségével végeztük. Az erek sötét volta miatt az ér egy pontjában az éliránynak megfelelő kernellel végzett konvolúció alacsonyabb értéket ad, mint az egyéb irányultságú maszkok. Ezt kihasználva egy adott pontban az

$$I_\alpha(p) = \arg \min_{\beta \in]-90^\circ, +90^\circ]} (I(p) * (G_\beta - G_{\beta+90}))$$

képlettel becsülhető a domináns él iránya, ahol β a kernel elforgatásának szöge, I a felső szárnyat tartalmazó kép vörös csatornája, a $*$ pedig a konvolúciót jelöli. Összesen $r+1$ darab kernelt használtunk.

Hibatérkép készítés

A hibatérkép előállítására az adott ér keresési tartományán belül történik, kivéve abból az előzőleg már detektált erek, és az erektől északra vagy keletre első részeket.

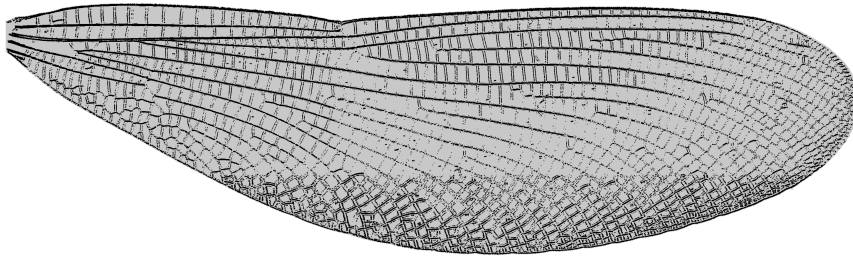
Az érhálózat és a szárny egyéb pontjait adaptív vágás segítségével különítjük el [13]. A hibatérképen az érponthoz 0-ás, a többi pont 1-es értéket kapnak. Az erek elvékonyodásának kompenzálására a kép alsó és jobb oldali harmadán egy 3×3 -as kereszt alakú struktúraelemmel morfológiai eróziót végzünk (háttérnek a 0-ás értékeket tekintve).

Végül 1-esre állítjuk azon pontok értékét, ahol a domináns élírány ($I_\alpha(p)$) és a modell ér alapján számolt élírány ($M_\alpha(p)$) abszolútértékben vett különbsége 45° felett van.

A szögűző nem törli el teljesen az él irányának nem megfelelő éleket, ugyanis az adaptív vágás egy kicsit kiszélesítve adja vissza az ereket, amit az erózióval mi is fokozunk, azonban rendre eltörli a keresztbe futó erek középső részét (54. ábra). Ennek hatékonysága majd a gráfépítés után figyelhető meg igazán (57. ábra), ahol a túl sok hibával terhelt szakaszok meg sem jelennek lehetséges útvonal szakaszként.

Gráf felépítése

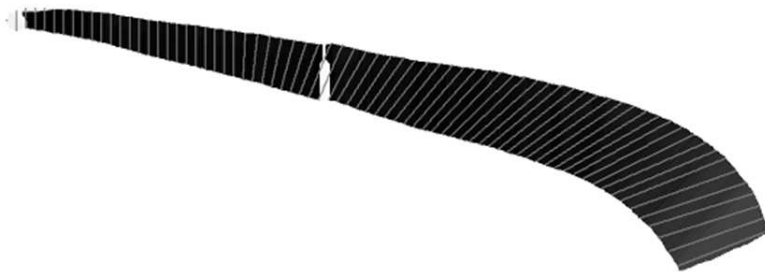
Az algoritmus áttekintésénél már említettük, hogy az erek közelítését rövid szakaszokkal végeztük. A kivitelezés során réteges felépítést használunk, ehhez első körben meghatározzuk a vizsgált képrész ($M_\alpha < \infty$) külső, illetve a belső körvonalát. A belső körvonal modellér alá vagy tőle balra eső körvonalpontokat, a belső a modellér fölött, vagy attól jobbra elhelyezkedő pontokat jelöli. A két görbén balról-jobbra haladva, egyenletes lépésközzel jelölünk ki, majd az azonos sorszámú pontokat összekötő



54. ábra. Egy hibatérkép a szegély alatti ér keresésekor: a szárnyon belül a fekete pontok hibaértéke 0, a szürkéké 1, a fehér pontoké ∞ . (A kép készítésekor a keresési tartománynak az egész szárnyat tekintettük, hogy a szögre vonatkozó szűrő hatása jobban megfigyelhető legyen.)

szakaszokon egyenletes mintavételezéssel jelöljük ki a csúcspontokat (55. ábra). Az élpontra eső végponttal rendelkező erek esetében a gráf kiegészül egy újabb réteggel, melybe a szárny a vizsgált területen belülről eső pontjai kerülnek.

A belső kontúron a pontok kijelöléséhez használt lépésköz a modellalapú szögszámítás során használt szakasz mérete ($s = 2r + 1$), míg a külső kontúrnál a annak külső és a belső kontúrhosszának hányadosával vett szorzata.



55. ábra. Szakaszvégpontok kijelöléséhez használt rétegek a szögtérkép vizsgált részére rajzolva [112]

Bármely csúcspontból csak a rákövetkező rétegbe lévő csúcspontba,

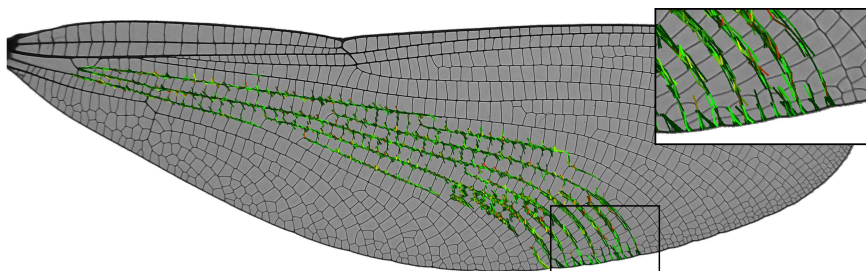
illetve a végpontok rétegébe vezethet él. Az élek hibáját a

$$w(e) = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{p \in L_e} (I_{err}(p)), & \text{ha } \sum_{p \in L_e} \delta(p) < t_{err} \text{ és } n < 2s, \\ \infty, & \text{különben} \end{cases}$$

képlet adja meg, ahol az L_e az e él által reprezentált, az élek végpontjait összekötő n hosszúságú egyenes szakasz és

$$\delta(p) = \begin{cases} 1, & \text{ha } I_{err}(p) = 1, \\ 0, & \text{különben.} \end{cases}$$

A t_{err} paraméterrel szabályozható, hogy maximálisan hány biztos háttérpontnak tekintett pixelen haladhat át egy szakasz, melyre az érhálózat kiemelése során bekövetkezett detektálási hibák miatt lehet szükség (56. ábra).



56. ábra. Kijelölt szakaszok és hibájuk a középér keresése során. A sötétzöld szakaszok alacsony hibaértéket, a világosabb zöld közepes, a sárgás, pirosas szín magas hibát jelöl.

Csatlakozási hiba

A szitakötőszárnyak fontosabb ereit nézve, (a hónaljtóeret kivéve, mely pont a törések miatt szakaszonként került be a modellbe) nincsenek jelentős „törések”, ezért az útvonal keresése során még egy

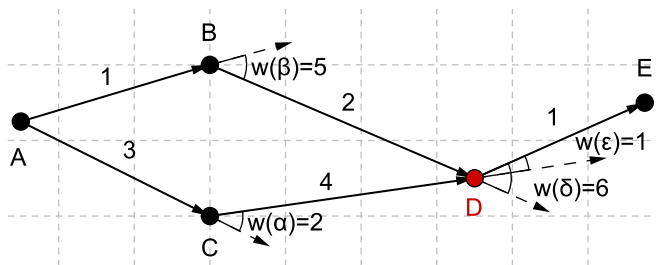
$$w(e_1, e_2) = \begin{cases} \infty, & \text{ha } \angle(L_{e_1}, L_{e_2}) > 20^\circ \\ \angle(L_{e_1}, L_{e_2}) & \text{különben} \end{cases}$$

csatlakozási hibát is felhasználtunk, ahol $\angle(e, f)$ az e és f élek által reprezentált vektorok bezárt szöge.

A legjobb út keresése

A legkisebb hibájú utak keresésére Dijkstra algoritmust [31] kívántunk alkalmazni, bináris kupacot használva a minimális költségű csomópont gyors kiválasztásához [59].

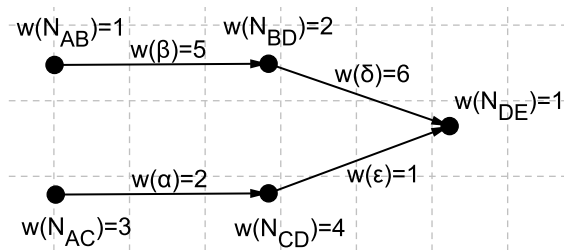
A csatlakozási hiba beépítésével viszont minden csúcspontban annyi hibaérték áll elő, amennyi az oda befutó és onnan kimenő élek szorzata. Ez azt is maga után vonja, hogy a „sima” súlyozott irányított gráfokkal szemben, egy U csúcson keresztül V csúcsba vezető legkisebb költségű út nem feltétlenül azonos az U -ba vezető legkisebb költségű út és az U -ból V -be vezető legkisebb költségű út költségének összegével (57. ábra).



57. ábra. Egy példa arra, amikor a legkisebb költségű út egy részútja nem a legkisebb költségű. Az A -ból D -be jutás költsége B -n keresztül a legkisebb (8), A -ból E -be viszont az $ACDE$ útvonal a legjobb, mert kevésbé törik meg, mint az $ABDE$.

Annak biztosítására, hogy a Dijkstra algoritmus mégis a legkisebb költségű utakat adja vissza a csomópontok közt, a csatlakozási hibával kiegészített gráfból egy „szokásos”, egyszerű, irányított gráfot származtatunk.

A származtatott gráfban az eredeti gráf élei csúcspontként vannak reprezentálva, ahol minden csúcs hibája azonos az által reprezentált él súlyával. Az eredeti gráf csúcspontjai pedig élekké alakulnak át. Az új gráf egy A csúcsából akkor vezet él a B csúcsába, ha az A által reprezentált szakasz végpontja azonos a B által reprezentált szakasz kezdőpontjával és a csatlakozási hiba nem végtelen (58. ábra).

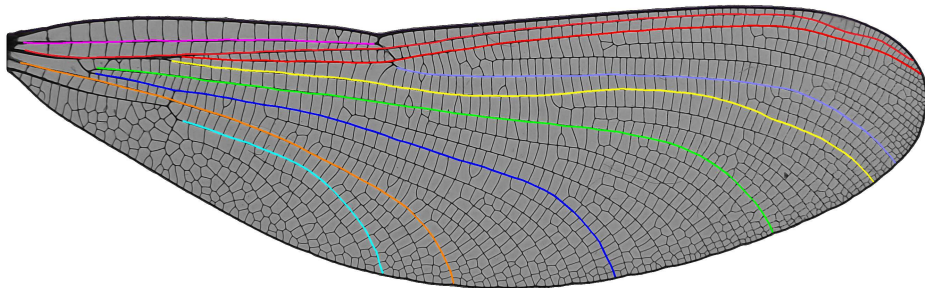


58. ábra. A 57.ábrán látott gráfból származtatott gráf

A keresés során a lehetséges kezdőpontok halmazát a gráf azon csúcsai adják, melyekből vezet tovább él és az csúcs által reprezentált szakasz kezdőpontja egy rögzített sugáron belül helyezkedik el a modellbeli ér kezdőpontjához képest.

A nem körvonalra eső végpontokat halmazát hasonlóan jelöljük ki, azon csúcsok kerülnek ide, melyekbe vezet él, de belőlük nem vezet él tovább, és az általuk reprezentált szakasz végpontja egy adott sugáron belül van a modellbeli szakasz végpontjához képest. A körvonalra eső pontoknál a halmazt a végpontok rétegének azon elemei adják, melyekbe vezet él.

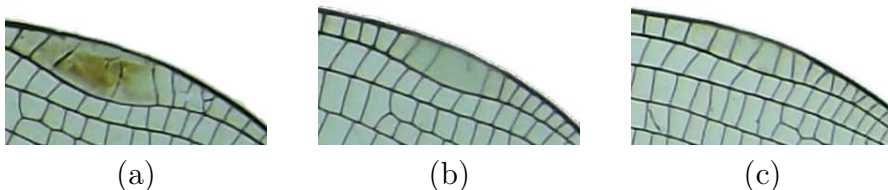
A alak leírásánál elsősorban azok a kivezetési pontok a hasznosak, melyek egymástól távol helyezkednek el, ezért a mérések során elsősorban a sugárér, a középér és a tőér vagy a hónaljtóér meghatározása az érdekes, de, ahogy azt a (59. ábra) is mutatja, a többi ér keresésére is alkalmas a módszer, amennyiben az adott ér szerepel a modellben.



59. ábra. Az érdetektálás eredménye a főbb erek keresésénél

4.3.7. Álszárnyjegy kiterjedésének mérése nőstény egyedeknél

A nőstény egyedek álszárnyjegye minden esetben a szegélyér és a sugárér közt, a szárnycsúcshoz közel helyezkedik el. Színezete fehéres, sárgás-barnás, néha alig üt el a szárny többi részétől (60. ábra), ezért valójában nem magát a szárnyjegyet, hanem a sugárér szárnyjegy okozta deformitását használjuk a szárnyjegy kiterjedésének számszerűsítésére.

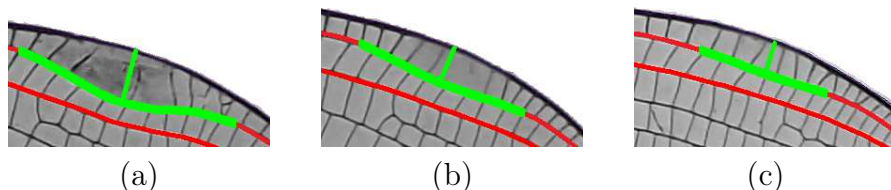


60. ábra. Egy feltűnő (a), egy közepesen feltűnő (b) és egy nagyon halvány álszárnyjegyről (c) készült felvétel

Egész pontosan a sugárér utolsó ötödébe eső konkáv szakaszok (C) közül kerül kiválasztásra az a szakasz, melynél a

$$\max \left(\min_{p \in C, q \in u} (d(p, q)) \right)$$

érték, vagyis a sugárér és a szegélyér legszélesebb helyén mért távolsága maximális. A képletben az u a szegélyeret, $d(p, q)$ pedig a p és q pont Euklideszi távolságát jelöli (61. ábra).



61. ábra. A 60. ábrán látható álszárnyjegyek okozta deformitás detektálásának eredménye. Pirossal a sugárér ill. a 2. sugárér látható, zölddel a sugárér konkáv szakasza, illetve az álszárnyjegy legszélesebb része.

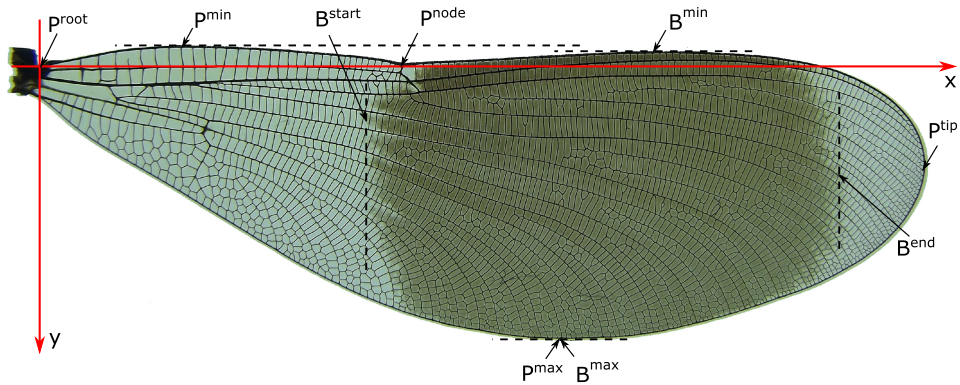
4.3.8. Jellemzőszámítás

A korábbi lépések során meghatározott pontok mellett újabb, a 62., 63. ábrán látható, a szárny és a folt kiterjedését leíró pontok kerülnek meghatározásra. Ezek számítására nem térünk ki, mivel a korábbi lépések kimenetei alapján ez könnyedén megvalósítható.

A morfometriai elemzéshez szükséges és egyéb (pl. az egyed korára utaló) adatokat mindkét nem esetében a 10. táblázat foglalja össze.

4.4. Képfeldolgozó algoritmus kiértékelése

A szárnytő és szárnybütyök pontok detektálásának pontosságának megállapításához 25-25 teljesen ép elülső szárnyú nőstény és hím szitakötőről készült képét használtuk fel. A program által meghatározott kimenetet a kézzel jelölt pontokkal vetettük össze (11. táblázat). Az eredmények azt mutatják, hogy az algoritmus által visszaadott pontok jól közelítik a manuálisan jelölt pontokat,



62. ábra. *Calopteryx splendens* hím imágó szárnyának mérési pontjai: P^{root} – (felső) szárnytőpont, P^{min} , P^{max} – a szárny legkisebb ill. legnagyobb y koordinátájú pontja, P^{tip} – szárnycsúcs, P^{node} – szárnybütyök, B^{start} , B^{end} – a szárnyfolt legkisebb, ill. legnagyobb x koordinátájú pontja, B^{min} , B^{max} – a szárnyfolt legkisebb, ill. legnagyobb y koordinátájú pontja,

különösen a szárnybütyök pont meghatározásánál. A szárnytőpont detektálásnál egy-egy esetben pixelszámot nézve előfordult nagyobb eltérés, de a szárnymérethez viszonyítva még ezek a hibák is elenyészőnek számítanak, a hiba minden esetben messze 0,5 mm alatt maradt.

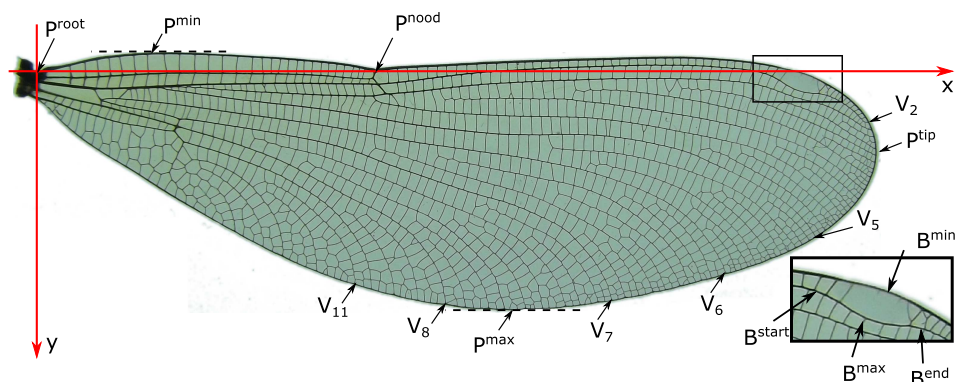
A nőstény minták alacsony száma miatt az érdetektáló részt a teljesen ép hátsó szárnyakra is teszteltük, így 26-26 (de, nem feltétlenül azonos egyedhez tartozó) ép szárny állt a rendelkezésre, melyből 1-1 szárnyat a modell készítéséhez használtunk fel. A tőér 3 szakaszából a végpont detektálásához szükséges 3. szakasz (szegélyérhez csatlakozó rész) került a modellbe. Egy adott ér detektálást csak akkor tekintettünk helyesnek, ha a visszaadott görbe végig a keresett éren futott és valóban eljut az ér végéig.

A futtatás során 19-es lépésközt (r) és 5-ös szakadási hibát (t_{err}) használtunk. A keresési tartomány szabályozására szolgáló $D_L(q)$ értéke minden érnél 75 volt a kezdőpontban, melyet lineárisan

növeltünk. A növekmény a szegély alatti érre 0, a sugárérre $150/n$, a 2. sugárérre $250/n$ minden más érre $500/n$ volt, ahol n a modellér hosszúsága. A végérték (számláló + 75) szemléletesen azt jelenti, hogy a modellér végpontjánál annak felét engedjük meg eltérésként mindkét irányban.

A 450 vizsgált ér közül 3 olyan eset volt, amikor az algoritmus egyáltalán nem detektált az eret, ebből kettőt ugyanazon egyednél történt, ugyanis az egyed első és hátsó szárnyán a sugárér és a 2. sugárér egybeforrt. Ezen kívül a sugárérnél több esetben fordultak elő kisebb kivezetési hibák, ami alatt azt értjük, hogy bár jó ér detektálása történt meg, a kelleténél valamennyivel előbb futott ki a szegélyérre a detektált út (12. táblázat, 64. ábra).

A bemutatott eljárás implementálása C++ nyelven történt, OpenCV függvénykönyvtár felhasználásával [52]. A sebesség méréséhez a kódot Intel^(R) CoreTM i3-2120 CPU-val és 8GB



63. ábra. *Calopteryx splendens* nőstény imágó szárnyának mérési pontjai: P^{root} – (felső) szárnytőpont, P^{min} , P^{max} – a szárny legkisebb ill. legnagyobb y koordinátájú pontja, P^{tip} – szárnycsúcs, P^{node} – szárnybügök, B^{start} , B^{end} – az álszárnyjegy legkisebb, ill. legnagyobb x koordinátájú pontja, B^{min} , B^{max} – az álszárnyjegy legszélesebb szakaszának kezdő ill. végpontja, és a sugárér (V_1), 4. sugárér (V_5), 5. sugárér (V_6), középér (V_7), tőér (V_8), hónaljtóér (V_{11}) kivezetési pontjai

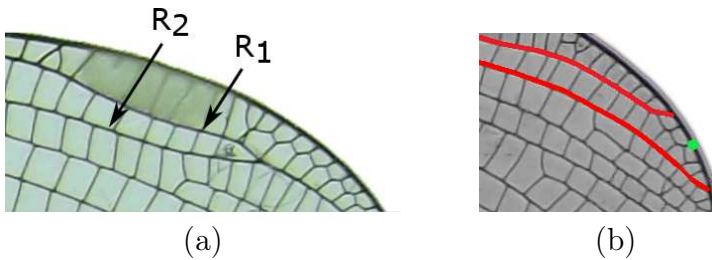
10. táblázat. A hím, ill. nőtény egyedeknél számított jellemzők. A táblázatban a $d(p, q)$ a p és q pontok Euklideszi távolságát, a P, B, V pontok különböző indexszekkel ellátott változatai a 62., 63. ábrákon látható pontokat jelölik.

Nem	Leírás, képlet
♂/♀	szárny területe: a szárny pontjainak száma
♂/♀	szárny hossz 1.: $P_x^{tip} - P_x^{root}$
♂/♀	szárny hossz 2.: $d(P^{tip}, P^{root})$
♂/♀	szárny szélesség 1.: $P_y^{max} - P_y^{min}$
♂/♀	folt/álszárnyjegy pozíció 1.: $d(B^{start}, P^{root})$
♂/♀	folt/álszárnyjegy pozíció 2.: $d(B^{end}, P^{tip})$
♀	álszárnyjegy hossza: $d(B^{start}, B^{end})$
♀	álszárnyjegy szélessége: $d(B^{max}, B^{min})$
♀	szárnytő – érvégződés: $d(P^{root}, V_i), i \in \{2, 5, 6, 7, 8, 11\}$
♀	szárnybütyök – érvégződés: $d(P^{node}, V_i), i \in \{2, 5, 6, 7, 8, 11\}$
♀	érvégzödések eltérései: $d(V_i, V_j), i, j \in \{2, 5, 6, 7, 8, 11\}, i \neq j$
♂	szárnyfolt hossza: $B_x^{end} - B_x^{start}$
♂	szárnyfolt szélessége: $B_y^{max} - B_y^{min}$
♂	szárnyfolt területe: a szárnyfolt pontjainak száma
♂	a szárnyfolt P_x^{node} -től balra eső részének területe
♂	szárnyfolt átlagos intenzitása

memóriával rendelkező PC-n, Windows 8.1 Enterprise 64 bites operációs rendszer alatt futtattuk. A mérések során az eredeti 4288×3216-os képmérettel dolgoztunk. Száz futtatás alapján a hím egyedek elülső szárnyának detektálása és feldolgozása átlagosan 0,83 másodpercet vett igénybe. A nőtény egyedeknél a főbb erek detektálása időigényes folyamat, ezért bizonyos részeket (éllirányszámítás, szegmentálás, hibatérkép készítés, gráffelépítés)

11. táblázat. Szárnytő és szárnybütök detektálás pontossága. A vizsgált egyedek átlagos szárnyhossza a nőstény egyedeknél 2662,92, a hímeknél 2659,12 pixel volt.

	hím		nőstény	
	szárnytő	szárnybütök	szárnytő	szárnybütök
átlagos eltérés	3,34 px	6,9 px	4,55 px	7,13 px
szórás	1,48 px	4,9 px	2,53 px	4,77 px
maximális eltérés	7,21 px	24,17 px	10,2 px	22,09 px
	0,08 mm	0,25 mm	0,13 mm	0,28 mm



64. ábra. (a) Összeforrt sugárér (R_1) és 2. sugárér (R_2). (b) Helytelenül detektált végpont: pirossal a program által detektált sugárér (felső ér), zölddel a sugárér helyes kivezetési pontja.

OpenMP API-ban [78] specifikált eszközökkel párhuzamosítottunk. Az elülső szárnyak feldolgozásához így átlagosan 10,98 másodpercre volt szükség az összes főbb ér detektálása során.

12. táblázat. A hibák száma 25 nőstény és 25 hím imágó fontosabb ereinek detektálásánál

ér megnevezése	első szárny		hátsó szárny	
	hiba szám	hiba oka	hiba szám	hiba oka
szegélyér alatti ér	0		0	
sugárér	3	kivezetési hibák	2	nem talált utat, ill. kivezetési hiba
2. sugárér	1	fejlődési rendellenesség	1	fejlődési rendellenesség
3. sugárér	0		0	
4. sugárér	0		0	
5. sugárér	0		0	
középér	0		0	
hónaljtóér	0		0	
tőér	0		0	

5. Összefoglalás

Az értekezésben három különböző kutatás képfeldolgozással kapcsolatos részletei kerültek ismertetésre.

Elsőként, az értekezés 2. fejezetében az üvegek felületi rétegeiben maradó feszültségek vizsgálatára szolgáló módszert mutattam be, melyet a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékének, és a Fémtani és Képlékenyalakítási Intézeti Tanszék néhány munkatársaival közösen alakítottunk ki. A karcvizsgálat által roncsolt terület detektálására egy iteratív küszöbölésre épülő, gráfalapú szegmentálással kiegészített eljárást adtunk. A módszer a kézi jelölésekkel való összevetés alapján megfelelőnek bizonyult a mérések automatikus elvégzéséhez.

Több olyan, a károsodott terület jellemzésére szolgáló paramétert (pl.: karcnyom területe) is sikerült azonosítani, ahol a jellemzők átlaga szignifikáns eltérést mutat a nyomófeszültséggel terhelt, illetve feszültségmentes minták esetében. A teljes képhez azonban hozzá tartozik, hogy az üvegtípusonkénti alacsony mintaszám miatt a paraméterek további vizsgálata szükséges.

Az értekezés harmadik fejezete immunhisztokémiai festéssel kezelt, csontvelőbiopsziás metszetek elemzéséről szól, mely a Debreceni Egyetem Pathologiai Intézetében végzett egyik kutatáshoz, a PDGFR- β expresszió és myelofibrosis kapcsolatának kutatásához ad támogatást. A kidolgozott módszer a vérképző állomány és az immunpozitív területek detektálására alkalmas. A festés felbontása Ruifrok és Johnston által leírt eljárással történik [88]. A immunpozitív területek és a sejtmagokat tartalmazó részek meghatározása a teljes metszet alapján a meghatározott küszöbérték felhasználásával történt. A vérképző állomány rekonstruálása pozitívítást mutató területek és a sejtmagok kiterjesztésével történt meg. A zsírsejteket és a háttért tartalmazó részek sejtplazmától való megkülönböztetéséhez döntési fát

használtunk. A csont- és izomszerű objektumok detektálásához pedig Shi és társai eljárását [97] adaptáltuk és a szétesett csontdarabkák egyesítése érdekében Watershed transzformációval egészítettük ki.

A tesztek alapján elmondható, hogy az eljárás magas specificitásra (95,59%) képes, miközben az egyéb értékek (szenzitivitás, precizitás, pontosság) is megfelelő szinten maradnak.

Az értekezés befejezésének időpontjáig egy kis mintaszámmal végzett (55 primer myelofibrosis, melyből 6 prefibrotikus), egy éves időtartamra korlátozott követéses vizsgálat zajlott le, ezért az emelkedett PDGFR- β expresszió prediktív szerepével kapcsolatban korai lenne bármilyen következtetést levonni. Ennek eldöntésére további, nagyobb esetszámmal végzett vizsgálat szükséges. Mindenesetre a PDGFR- β és a MF grádus erős kapcsolata alapján az immunhisztokémiai vizsgálat megoldást jelenthet azoknál az eseteknél, ahol a retikulín festés nehezen értelmezhető [76].

A negyedik fejezetben egy sávós szitakötők szárnyának elemzéséhez fejlesztett eljárás került leírásra. A szárnytő, szárnycsúcs és szárnybütyök pontok lokalizálásán túl hímek esetében a szárnyfolt, nőstények esetében az álszárnyjegy és a fontosabb erek detektálását teszi lehetővé a bemutatott módszer. Az ér meghatározásához legkisebb költségű út keresésére szolgáló algoritmust alkalmazunk, egy kézi jelölésű modelltől származó ér mentén felépített „szakaszerdőre”. A szakaszok hibája a szegmentált érhálózat, a domináns élírány és a modellbeli ér irányának eltérése alapján kerül meghatározásra, melyhez a csatlakozó szakaszok bezárt szöge is hozzáadódik.

A tesztek alapján elmondható, hogy az automatikus eljárás jól használható a kézi mérések kiváltására. A szárnytő és szárnybütyök pontok meghatározásánál az eltérés a legrosszabb esetben is alig haladta meg a negyed millimétert, az erek detektálása pedig 97% feletti pontossággal történt meg.

A kifejlesztett program a Debreceni Egyetem Hidrobiológiai Tanszékén folyó Sávós szitakötők taxonómiai revíziójával kapcsolatos elemzésekhez szolgáltatott adatokat. Hazánkban, a korábbi felmérések alapján a Calopteryx splendens *splendens* alfaja van számontartva [36], azonban a jelenleg is zajló kutatás során végzett vizsgálatok arra utalnak, hogy más alfaj, vagy még inkább alfajok is jelen vannak [107, 108, 109].

Irodalomjegyzék

- [1] Ž. R. Adamović, S. T. Vijatov: Morphometric examination of calopteryx balcanica fudakowsky, 1930 and c. splendens ancilla selys, 1853 (zygoptera: Calopterygidae). *Odonatologica*, 25. évf. (1996) 2. sz., 109–118. p.
- [2] Max K Agoston: *Computer graphics and geometric modeling*. 1. köt. 2005, Springer.
- [3] Y. Al-Kofahi, W. Lassoued, W. Lee, B. Roysam: Improved automatic detection and segmentation of cell nuclei in histopathology images. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 57. évf. (2010) 4. sz., 841–852. p.
- [4] M. Amadasun, R. King: Textural features corresponding to textural properties. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 19. évf. (1989. Sep) 5. sz., 1264–1274. p. ISSN 0018-9472.
- [5] M. Anderson, R. Motta, S. Chandrasekar, M. Stokes: Proposal for a standard default color space for the internet—srgb. In *Color and imaging conference* (konferenciaanyag), 1. köt. 1996, Society for Imaging Science and Technology, 238–245. p.
- [6] R. R. Askew: The dragonflies of europe (revised edition). *Entomologists Record And Journal of Variation*, 116. évf. (2004) 5. sz., 239–240. p.
- [7] ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. *ASTM D7027-05e1, Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine*. 2005.
- [8] ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. *ASTM G 171 - 03-05e1, Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*. 2005.

- [9] D. E. Bauermeister: Quantitation of bone marrow reticulin—a normal range. *American Journal of Clinical Pathology*, 56. évf. (1971) 1. sz., 24–31. p.
- [10] P. A. Bautista, Y. Yagi: Improving the visualization and detection of tissue folds in whole slide images through color enhancement. *Journal of pathology informatics*, 1. évf. (2010).
- [11] J. Bedekovics: *A csontvelői stroma aktivációja különböző onkohematológiai kórképekben*. PhD értekezés (Klinikai Orvostudományok Doktori Iskola, Debrecen). 2014.
- [12] J. Bedekovics, A. Kiss, L. Beke, K. Károlyi, G. Méhes: Platelet derived growth factor receptor-beta (pdgfr β) expression is limited to activated stromal cells in the bone marrow and shows a strong correlation with the grade of myelofibrosis. *Virchows Archiv*, 463. évf. (2013) 1. sz., 57–65. p.
- [13] D. Bradley, G. Roth: Adaptive thresholding using the integral image. *Journal of graphics, gpu, and game tools*, 12. évf. (2007) 2. sz., 13–21. p.
- [14] L. Breiman, J. H. Friedman, R. Olshen, C. J. Stone: *Classification and regression trees*. 1984.
- [15] E. M. Brey, Z. Lalani, C. Johnston, M. Wong, L. V. McIntire, P. J. Duke, C. W. Patrick: Automated selection of dab-labeled tissue for immunohistochemical quantification. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 51. évf. (2003) 5. sz., 575–584. p.
- [16] R. L. Browning: *Fundamental scratch behavior of styrene-acrylonitrile random copolymers*. PhD értekezés (BME, Budapest). 2006.
- [17] R. L. Browning, G.-T. Lim, A. Moyse, H.-J. Sue, H. Chen, J. D. Earls: Quantitative evaluation of scratch resistance of polymeric coatings based on a standardized progressive load scratch test.

Surface and Coatings Technology, 201. évf. (2006) 6. sz., 2970 – 2976. p. ISSN 0257-8972.

- [18] S. J. Bull: Failure modes in scratch adhesion testing. *Surface and Coatings Technology*, 50. évf. (1991) 1. sz., 25–32. p.
- [19] J. Canny: A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1986. 6. sz., 679–698. p.
- [20] V. Caselles, F. Catté, T. Coll, F. Dibos: A geometric model for active contours in image processing. *Numerische Mathematik*, 66. évf. (1993) 1. sz., 1–31. p. ISSN 0029-599X.
- [21] J. Cham: PhDComics. <http://www.phdcomics.com/comics/archive/phd092306s.gif>. Látogatva: 2016.03.29.
- [22] T. F. Chan, L. A. Vese: Active contours without edges. *Trans. Img. Proc.*, 10. évf. (2001. február) 2. sz., 266–277. p. ISSN 1057-7149.
- [23] H. Chang, L. A. Loss, B. Parvin: Nuclear segmentation in h and e sections via multi-reference graph-cut (mrgc). In *International Symposium Biomedical Imaging* (konferenciaanyag). 2012.
- [24] B. Chazelle: A minimum spanning tree algorithm with inverse-ackermann type complexity. *J. ACM*, 47. évf. (2000. november) 6. sz., 1028–1047. p. ISSN 0004-5411. 20 p.
- [25] N. S. Claxton, T. J. Fellers, M. W. Davidson: Laser scanning confocal microscopy. *Department of Optical Microscopy and Digital Imaging, Florida State University, Tallahassee*, 2006.
- [26] L. D. Cohen: On active contour models and balloons. *CVGIP: Image Understanding*, 53. évf. (1991) 2. sz., 211–218. p. ISSN 1049-9660.

- [27] Á. Czifra: *A felületi mikrotopográfia jellemzése fém-fém és fém-kerámia alkatrészek csúszósúrlódása során*. PhD értekezés (BME, Budapest). 2006.
- [28] C. G. Demayo, S. A. Harun, M. A. J. Torres: Procrustes analysis of wing shape divergence among sibling species of neurothemis dragonflies. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5. évf. (2011) 6. sz., 748–759. p.
- [29] R. Deriche: Using canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector. *International Journal of Computer Vision*, 1. évf. (1987) 2. sz., 167–187. p. ISSN 0920-5691.
- [30] S. Di Cataldo, E. Ficarra, A. Acquaviva, E. Macii: Automated segmentation of tissue images for computerized IHC analysis. *Computer methods and programs in biomedicine*, 100. évf. (2010) 1. sz., 1–15. p.
- [31] Edsger W Dijkstra: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1. évf. (1959) 1. sz., 269–271. p.
- [32] K.-D. B. Dijkstra, V. J. Kalkman: Phylogeny, classification and taxonomy of european dragonflies and damselflies (odonata): a review. *Organisms Diversity & Evolution*, 12. évf. (2012) 3. sz., 209–227. p. ISSN 1439-6092.
- [33] K.-D. B. Dijkstra, R. Lewington: *Field Guide to the Dragonflies of Britain and Europe: Including western Turkey and north-western Africa*. 2006, British Wildlife Publishing Dorset.
- [34] DIN EN 1071-3 L. *Advanced technical ceramics - Method of test for ceramic coatings - Part 3: Determination of adhesion and other mechanical failure modes by a scratch test*. 2005.
- [35] H. Dumont, J. Mertens, W. De Coster: The calopteryx-splendens-cline in southwestern france, analysed

by quantitative wingspot analysis (zygoptera: Calopterygidae). *Odonatologica*, 22. évf. (1993), 345–351. p. ISSN 0375-0183.

- [36] Gy. Dévai: A magyarországi szitakötő (odonata) fauna taxonómiai és nómenklaturai revíziója. *A debreceni Déri Múzeum 1977. évi Évkönyve*, 1978., 81–96. p.
- [37] P. F. Felzenszwalb, D. P. Huttenlocher: Efficient graph-based image segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 59. évf. (2004) 2. sz., 167–181. p.
- [38] R. Fu, X. Ma, Z. Bian, J. Ma: Digital separation of diaminobenzidine-stained tissues via an automatic color-filtering for immunohistochemical quantification. *Biomedical optics express*, 6. évf. (2015) 2. sz., 544–558. p.
- [39] Y. Garini, I. T. Young, G. McNamara: Spectral imaging: principles and applications. *Cytometry Part A*, 69. évf. (2006) 8. sz., 735–747. p.
- [40] M. Gavrilovic, J. C. Azar, J. Lindblad, C. Wahlby, E. Bengtsson, C. Busch, I. B. Carlbom: Blind color decomposition of histological images. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 32. évf. (2013) 6. sz., 983–994. p.
- [41] M. A. Gonzalez, T. R. Cuadrado, V. L. Ballarín: Comparing marker definition algorithms for watershed segmentation in microscopy images. *Journal of Computer Science & Technology*, 8. évf. (2008).
- [42] M. A. Gonzalez, G. J. Meschino, V. L. Ballarín: Solving the over segmentation problem in applications of watershed transform. *Journal of Biomedical Graphics and Computing*, 3. évf. (2013) 3. sz., p29. p.
- [43] P. T. Gonzalez-Bellido, H. Peng, J. Yang, A. P. Georgopoulos, R. M. Olberg: Eight pairs of descending visual neurons in the dragonfly give wing motor centers accurate population vector of

- prey direction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110. évf. (2013) 2. sz., 696–701. p.
- [44] A. Goode, B. Gilbert, J. Harkes, D. Jukic, M. Satyanarayanan et al.: Openslide: A vendor-neutral software foundation for digital pathology. *Journal of pathology informatics*, 4. évf. (2013) 1. sz., 27. p.
- [45] M. N. Gurcan, T. Pan, H. Shimada, J. Saltz: Image analysis for neuroblastoma classification: Segmentation of cell nuclei. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE* (konferenciaanyag). 2006, IEEE, 4844–4847. p.
- [46] H. A. Gyulavári, T. Felföldi, T. Benken, L. J. Szabó, M. Miskolczi, Cs. Cserháti, V. Horvai, K. Márialigeti, Gy. Dévai: Morphometric and molecular studies on the populations of the damselflies *chalcolestes viridis* and *c. parvidens* (odonata, lestidae). *International Journal of Odonatology*, 14. évf. (2011) 4. sz., 329–339. p.
- [47] L. He, L. R. Long, S. Antani, G. R. Thoma: Local and global gaussian mixture models for hematoxylin and eosin stained histology image segmentation. In *Hybrid Intelligent Systems (HIS), 2010 10th International Conference on* (konferenciaanyag). 2010, IEEE, 223–228. p.
- [48] D. Houle, J. Mezey, P. Galpern, A. Carter: Automated measurement of drosophila wings. *BMC evolutionary biology*, 3. évf. (2003) 1. sz., 25. p.
- [49] International Organization for Standardization. *ISO 20502 Fine ceramics (advanced ceramics – advanced technical ceramics) – Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing*. 2005.

- [50] H. Irshad: Automated mitosis detection in histopathology using morphological and multi-channel statistics features. *Journal of pathology informatics*, 4. évf. (2013).
- [51] H. Irshad, A. Veillard, L. Roux, D. Racoceanu: Methods for nuclei detection, segmentation, and classification in digital histopathology: A review—current status and future potential. *Biomedical Engineering, IEEE Reviews in*, 7. évf. (2014), 97–114. p.
- [52] Itseez: Open source computer vision library. <https://github.com/itseez/opencv>, 2015.
- [53] H. Jiang, R. L. Browning, M. M. Hossain, H.-J. Sue, M. Fujiwara: Quantitative evaluation of scratch visibility resistance of polymers. *Applied Surface Science*, 256. évf. (2010) 21. sz., 6324 – 6329. p. ISSN 0169-4332.
- [54] M. J. Jones, J. M. Rehg: Statistical color models with application to skin detection. *International Journal of Computer Vision*, 46. évf. (2002) 1. sz., 81–96. p.
- [55] S. R. Jongerius, D. Lentink: Structural analysis of a dragonfly wing. *Experimental Mechanics*, 50. évf. (2010) 9. sz., 1323–1334. p.
- [56] M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos: Snakes: Active contour models. *International journal of computer vision*, 1. évf. (1988) 4. sz., 321–331. p.
- [57] J. Kállay, B. M. Maros, P. Barkóczy, J. Kaulics: Üvegek gyártási maradó feszültségének vizsgálata. In *microCAD'2006*. 2006, 61–68. p.
- [58] Gy. Knapp, O. Korányi: *Üvegipari kézikönyv*. 1964, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [59] W. Kocay, D. L. Kreher: *Graphs, algorithms, and optimization*. 2004, CRC Press.

- [60] R. S. Kody, D. C. Martin: Quantitative characterization of surface deformation in polymer composites using digital image analysis. *Polymer Engineering & Science*, 36. évf. (1996) 2. sz., 298–304. p. ISSN 1548-2634.
- [61] M. Kotaki, M. Wong, C. Xiang, H.-J. Sue: Scratch behavior of polypropylene-based blends. In *ANTEC 2002 Annual Technical Conference* (konferenciaanyag), 2002. köt. 2002.
- [62] Chakravanti Rajagopalachari Kothari: *Research methodology: Methods and techniques*. 2004, New Age International.
- [63] S. Kothari, J. H. Phan, M. D. Wang: Eliminating tissue-fold artifacts in histopathological whole-slide images for improved image-based prediction of cancer grade. *Journal of pathology informatics*, 4. évf. (2013).
- [64] D. J. Kuter, B. Bain, G. Mufti, A. Bagg, R. P. Hasserjian: Bone marrow fibrosis: pathophysiology and clinical significance of increased bone marrow stromal fibres. *British journal of haematology*, 139. évf. (2007) 3. sz., 351–362. p.
- [65] H.-A. Lehr, T. W. Jacobs, H. Yaziji, S. J. Schnitt, A. M. Gown: Quantitative evaluation of her-2/neu status in breast cancer by fluorescence in situ hybridization and by immunohistochemistry with image analysis. *American journal of clinical pathology*, 115. évf. (2001) 6. sz., 814–822. p.
- [66] Tóthné Parázsó Lenke: A kutatásmódszertan matematikai alapjai.
- [67] P.-S. Liao, T.-S. Chen, P.-C. Chung: A fast algorithm for multilevel thresholding. *J. Inf. Sci. Eng.*, 17. évf. (2001) 5. sz., 713–727. p.
- [68] F. Lu, E. E. Milios: Optimal spline fitting to planar shape. *Signal Processing*, 37. évf. (1994) 1. sz., 129 – 140. p. ISSN 0165-1684.

- [69] B. M. Maros, J. Kállay, P. Barkóczy: Izzólámpák üvegalkatrészeinek karcvizsgálatának kiértékelése számítógépes képelemzéssel. In *KÉPAF'07*. 2007, 79–85. p.
- [70] M. B. Maros, A. Fazekas, P. Barkóczy, Sz. Szeghalmy, Zs. Koncsik: Qualifying glass surfaces by scratch test with integrated image processing. *Key Engineering Materials*, 409. évf. (2009), 267–274. p.
- [71] M. Masseroli, T. Caballero, F. O'Valle, R. M. G. Del Moral, A. Pérez-Milena, R. G. Del Moral: Automatic quantification of liver fibrosis: design and validation of a new image analysis method: comparison with semi-quantitative indexes of fibrosis. *Journal of hepatology*, 32. évf. (2000) 3. sz., 453–464. p.
- [72] I. I. Matalka, O. M. Al-Jarrah, T. M. Manasrah: Quantitative assessment of liver fibrosis: a novel automated image analysis method. *Liver International*, 26. évf. (2006) 9. sz., 1054–1064. p.
- [73] Hand R. J. McKenzie, H. W. and: *Basic Optical Stress Measurement in Glass*. 1999, Society of Glass Technology. ISBN 978-0900682278.
- [74] J. Mertens, W. De Coster, H. De Meyer, H. Dumont: Wing-spot based quantitative analysis of calopteryx populations. *Odonatologica*, 21. évf. (1992), 443–451. p. ISSN 0375-0183.
- [75] G. Meschino, E. G. Moler, L. I. Passoni: Semiautomated segmentation of bone marrow biopsies images based on texture features and generalized regression neural networks. In *X Congreso Argentino de Ciencias de la Computación* (konferenciaanyag). 2004.
- [76] G. Méhes, A. Tzankov, K. Hebeda, I. Anagnostopoulos, L. Krenács, J. Bedekovics: Platelet-derived growth factor receptor β (pdgfr β) immunohistochemistry highlights activated bone marrow stroma and is potentially predictive for

fibrosis progression in prefibrotic myeloproliferative neoplasia. *Histopathology*, 2015.

- [77] E. Moghbelli, R. L. Browning, W.-J. Boo, S. F. Hahn, L. J. E. Feick, H.-J. Sue: Effects of molecular weight and thermal history on scratch behavior of polypropylene thin sheets. *Tribology International*, 41. évf. (2008) 5. sz., 425 – 433. p. ISSN 0301-679X.
- [78] ARB OpenMP: Openmp application program interface, v. 3.0. *OpenMP Architecture Review Board*, 2008.
- [79] S. Osher, J. A. Sethian: Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations. *Journal of computational physics*, 79. évf. (1988) 1. sz., 12–49. p.
- [80] Nobuyuki Otsu: A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11. évf. (1975) 285-296. sz., 23–27. p.
- [81] S. Palokangas, J. Selinummi, O. Yli-Harja: Segmentation of folds in tissue section images. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE* (konferenciaanyag). 2007, IEEE, 5641–5644. p.
- [82] P. Perona, J. Malik: Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 12. évf. (1990) 7. sz., 629–639. p.
- [83] N.-A. Pham, A. Morrison, J. Schwock, S. Aviel-Ronen, V. Iakovlev, M.-S. Tsao, J. Ho, D. W. Hedley: Quantitative image analysis of immunohistochemical stains using a cmyk color model. *Diagnostic pathology*, 2. évf. (2007) 1. sz., 8. p.
- [84] C. D. Ponton, R. D. Rawlings: Dependence of the vickers indentation fracture toughness on the surface crack length. *British Ceramic Transactions Journal*, 88. évf. (1989), 83–90. p.

- [85] Carl Ratner: Subjectivity and objectivity in qualitative methodology. In *Forum Qualitative Sozialforschung/Forum: Qualitative Social Research* (konferenciaanyag), 3. köt. 2002.
- [86] F. J. Rohlf: The tps series of software. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 26. évf. (2015) 1. sz., 9–12. p.
- [87] P. L. Rosin: Unimodal thresholding. *Pattern Recognition*, 34. évf. (2001) 11. sz., 2083 – 2096. p. ISSN 0031-3203.
- [88] A. C. Ruifrok, D. A. Johnston: Quantification of histochemical staining by color deconvolution. *Analytical and quantitative cytology and histology/the International Academy of Cytology [and] American Society of Cytology*, 23. évf. (2001) 4. sz., 291–299. p.
- [89] A. C. Ruifrok, R. L. Katz, D. A. Johnston: Comparison of quantification of histochemical staining by hue-saturation-intensity (HSI) transformation and color-deconvolution. *Applied Immunohistochemistry & Molecular Morphology*, 11. évf. (2003) 1. sz., 85–91. p.
- [90] Wang S., J. M. Siskind: Image segmentation with minimum mean cut. In *IEEE Computer Society* (konferenciaanyag). 2001, 517–524. p.
- [91] S. Sadeghi, D. Adriaens, H. J. Dumont: Geometric morphometric analysis of wing shape variation in ten european populations of calopteryx splendens (harris, 1782)(zygoptera: Odonata). *Odonatologica*, 38. évf. (2009) 4. sz., 343–360. p.
- [92] S. Sadeghi, H. J. Dumont: Variation in the shape of the wings and taxonomy of eurasian populations of the calopteryx splendens complex (odonata: Calopterygidae). *European Journal of Entomology*, 111. évf. (2014) 4. sz., 575. p.
- [93] J. Serra: *Image analysis and mathematical morphology, v. 1*. 1982, Academic press.

- [94] M. Sezgin, B. Sankur: Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13. évf. (2004) 1. sz., 146–168. p.
- [95] L. Shapiro, G. C. Stockman: Computer vision. 2001. *ed: Prentice Hall*, 2001.
- [96] J. Shi, J. Malik: Normalized cuts and image segmentation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22. évf. (2000) 8. sz., 888–905. p.
- [97] L. Shi, S. Liu, D. Wang, H.-L. Wong, W.-H. Huang, Y.-X. J. Wang, J. F. Griffith, P.-C. Leung, A. T. Ahuja: Computerized quantification of bone tissue and marrow in stained microscopic images. *Cytometry Part A*, 81. évf. (2012) 10. sz., 916–921. p.
- [98] J. Shu: *Immunohistochemistry image analysis: protein, nuclei and gland*. PhD értekezés (University of Nottingham). 2014.
- [99] J. C. Sieren, J. Weydert, A. Bell, B. De Young, A. R. Smith, J. Thiesse, E. Namati, G. McLennan: An automated segmentation approach for highlighting the histological complexity of human lung cancer. *Annals of biomedical engineering*, 38. évf. (2010) 12. sz., 3581–3591. p.
- [100] I. Sobel: Neighborhood coding of binary images for fast contour following and general binary array processing. *Computer Graphics and Image Processing*, 8. évf. (1978) 1. sz., 127 – 135. p. ISSN 0146-664X.
- [101] M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle: *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. 2007, Thomson-Engineering. ISBN 049508252X.
- [102] Spss statistics for windows, version 17.0., 2008.
- [103] V. Steinhage, S. Schroder, K. Lampe, A. B. Cremers: Chapter 8 – automated extraction and analysis of morphological features for species identification. *Systematics Association Special Volume*, 74. évf. (2007), 115. p.

- [104] P. A. Steinmann, Y. Tardy, W. E. Hintermann: Adhesion testing by the scratch test method: the influence of intrinsic and extrinsic parameters on the critical load. *Thin Solid Films*.
- [105] L.-P. Sung, P. L. Drzal, M. R. Vanlandingham, A. M. Forster: Metrology for characterizing the scratch resistance of polymeric coatings through optical scattering. *Tribology and Interface Engineering Series*, 51. évf. (2006), 102–123. p.
- [106] L.-P. Sung, P. L. Drzal, M. R. Vanlandingham, A. M. Forster: Physical characterization of coated surfaces - part ii : Scratch test. *Tribology and Interface Engineering Series*, 51. évf. (2006), 102–123. p.
- [107] P. É. Szalay, Sz. Szeghalmy, O. Kis, L. J. Szabó, M. Miskolczi, A. Fazekas, Gy. Dévai: A sávós szitakötő [*calopteryx splendens* (harris, 1782)] konyári-kállói imágópopulációjának morfológiai elemzése. *Studia odonotol. hung*, 17. évf. (2015), 23–44. p.
- [108] P. É. Szalay, Sz. Szeghalmy, O. Kis, Miskolczi M. Fazekas A. Dévai Gy. Szabó, L. J.: Alapadatok a sávós szitakötő [*calopteryx splendens* (harris, 1782)] konyári-kállói imágópopulációjának morfológiai elemzéséhez. *Studia odonotol. hung*, 15. évf. (2013), 9–26. p.
- [109] P. É. Szalay, Sz. Szeghalmy, L. J. Szabó, M. Miskolczi, A. Fazekas, Gy. Dévai: Comparative morphometric analysis of two hungarian *calopteryx splendens* population based on male wing traits. In *32. Jahrestagung der Gesellschaft deutschsprachiger Odonatologen (GdO e.V.)*. 2013, 70–71. p.
- [110] Sz. Szeghalmy, P. Barkóczy, M. B. Maros, A. Fazekas, Cs. Pólska: A new technique for characterization of residual stresses in glass surfaces: scratch test completed with image analysis. In *Materials Science Forum* (konferenciaanyag), 589. köt. 2008, Trans Tech Publ, 275–280. p.

- [111] Sz. Szeghalmy, J. Bedekovics, G. Méhes, A. Fazekas: Digital measurement of myelofibrosis associated platelet derived growth factor receptor β (pdgfr β) expression in bone marrow biopsies. *Journal of Computing and Information Technology*, 21. évf. (2013) 1. sz., 49–58. p.
- [112] Sz. Szeghalmy, P. É. Szalay, Gy. Dévai, A. Fazekas, O. Kis, L.J. Szabó, Miskolczi M.: Szitakötőszárnyak elemzése. In *KÉPAF 2013*. 2013, 542–549. p.
- [113] P. J. Tadrous: Digital stain separation for histological images. *Journal of microscopy*, 240. évf. (2010) 2. sz., 164–172. p.
- [114] F. Tamás: *Szilikátipari kézikönyv*. 1982, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [115] C. R. Taylor, R. M. Levenson: Quantification of immunohistochemistry—issues concerning methods, utility and semiquantitative assessment ii. *Histopathology*, 49. évf. (2006) 4. sz., 411–424. p.
- [116] J. Thiele, H. M. Kvasnicka, F. Facchetti, V. Franco, J. van der Walt, A. Orazi: European consensus on grading bone marrow fibrosis and assessment of cellularity. *haematologica*, 90. évf. (2005) 8. sz., 1128–1132. p.
- [117] A. Tofilski: Drawwing, a program for numerical description of insect wings. *Journal of Insect Science*, 4. évf. (2004) 1. sz., 17. p.
- [118] C. M. van der Loos: Multiple immunoenzyme staining: methods and visualizations for the observation with spectral imaging. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 56. évf. (2008) 4. sz., 313–328. p.
- [119] F. Varghese, A. B. Bukhari, R. Malhotra, A. De: IHC profiler: an open source plugin for the quantitative evaluation and automated scoring of immunohistochemistry images of human tissue samples. *PloS one*, 9. évf. (2014) 5. sz., e96801. p.

- [120] M. Veta, P. J. van Diest, R. Kornegoor, A. Huisman, M. A. Viergever, J. P. W. Pluim: Automatic nuclei segmentation in h&e stained breast cancer histopathology images. *PloS one*, 8. évf. (2013) 7. sz., e70221. p.
- [121] J.-I. Weon, S.-Y. Song, K.-Y. Choi, S.-G. Lee, J. H. Lee: Quantitative determination of scratch-induced damage visibility on polymer surfaces. *Journal of Materials Science*, 45. évf. (2010) 10. sz., 2649–2654. p.
- [122] S. D. Wiederman, D. C. O’Carroll: Selective attention in an insect visual neuron. *Current Biology*, 23. évf. (2013) 2. sz., 156–161. p.
- [123] H.-S. Wu, M. I. Fiel, T. D. Schiano, J. Gil: Image segmentation of liver fibrosis. *Journal of microscopy*, 231. évf. (2008) 1. sz., 70–80. p.
- [124] C. Xu, J. L. Prince: Snakes, shapes, and gradient vector flow. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 7. évf. (1998) 3. sz., 359–369. p.
- [125] T.-J. Yen: *A qualitative profile-based approach to edge detection*. PhD értekezés (New York University). 2003.
- [126] C. T. Zahn: Graph-theoretical methods for detecting and describing gestalt clusters. *Computers, IEEE Transactions on*, 100. évf. (1971) 1. sz., 68–86. p.

A. Függelék

13. táblázat. Shapiro-Wilk. normalitásvizsgálat eredménye a 2. fejezet 1. táblázatban szereplő paraméterekre

Paraméter	Csoport	Stat.	Df	Sig.
L	maradó nyomó	0,933	52	0,006
	fesz. mentes	0,979	80	0,222
W_{avg}	maradó nyomó	0,989	52	0,916
	fesz. mentes	0,984	80	0,397
W_{std}	maradó nyomó	0,923	52	0,003
	fesz. mentes	0,856	80	0,000
W_{min}	maradó nyomó	0,957	52	0,059
	fesz. mentes	0,854	80	0,000
W_{max}	maradó nyomó	0,941	52	0,012
	fesz. mentes	0,912	80	0,000
W_{med}	maradó nyomó	0,978	52	0,445
	fesz. mentes	0,984	80	0,437
Δy	maradó nyomó	0,913	52	0,001
	fesz. mentes	0,987	80	0,596
A	maradó nyomó	0,997	52	1,000
	fesz. mentes	0,984	80	0,411
D_{avg}	maradó nyomó	0,973	52	0,285
	fesz. mentes	0,992	80	0,926
S_{circ}	maradó nyomó	0,980	52	0,537
	fesz. mentes	0,945	80	0,002
S_{comp}	maradó nyomó	0,990	52	0,932
	fesz. mentes	0,984	80	0,421
A_{hull}	maradó nyomó	0,987	52	0,853
	fesz. mentes	0,984	80	0,394
P_{hull}	maradó nyomó	0,975	52	0,344
	fesz. mentes	0,991	80	0,830
S_{conv}	maradó nyomó	0,921	52	0,002
	fesz. mentes	0,976	80	0,134
S_{ecd}	maradó nyomó	0,995	52	0,999
	fesz. mentes	0,978	80	0,174
P	maradó nyomó	0,980	52	0,527
	fesz. mentes	0,990	80	0,769
S_{rect}	maradó nyomó	0,963	52	0,107
	fesz. mentes	0,941	80	0,001
A_{norm}	maradó nyomó	0,987	52	0,840
	fesz. mentes	0,984	80	0,402

14. táblázat. Levene teszt eredménye a 2. fejezet 1. táblázatban szereplő feszültségcsoportonként normális eloszlást mutató paraméterekre

Paraméter	Stat.	Df1	Df2	Sig.
W_{avg}	0,433	1	130	0,512
W_{med}	0,734	1	130	0,393
A	0,489	1	130	0,486
D_{avg}	0,252	1	130	0,617
S_{comp}	0,000	1	130	0,995
A_{hull}	0,219	1	130	0,641
P_{hull}	1,294	1	130	0,258
S_{ecd}	0,099	1	130	0,754
P	1,748	1	130	0,188
A_{norm}	0,432	1	130	0,512

15. táblázat. One-way ANOVA eredménye az 2. fejezet 1. táblázatban szereplő, a vizsgálat kritériumait kielégítő paraméterekre

Paraméter		Sum of Sq.	Df	Mean Square	F	Sig.
W_{avg}	Between Groups	2,3353E+04	1	2,3353E+04	27,837	$5,364 \cdot 10^{-07}$
	Within Groups	1,0906E+05	130	8,3895E+02		
	Total	1,3242E+05	131	0,0000E+00		
W_{med}	Between Groups	2,2543E+04	1	2,2543E+04	36,096	$1,768 \cdot 10^{-08}$
	Within Groups	8,1189E+04	130	6,2453E+02		
	Total	1,0373E+05	131	0,0000E+00		
A	Between Groups	3,5585E+11	1	3,5585E+11	30,739	$1,581 \cdot 10^{-07}$
	Within Groups	1,5050E+12	130	1,1577E+10		
	Total	1,8608E+12	131	0,0000E+00		
D_{avg}	Between Groups	1,5113E+04	1	1,5113E+04	25,592	$1,406 \cdot 10^{-06}$
	Within Groups	7,6768E+04	130	5,9053E+02		
	Total	9,1881E+04	131	0,0000E+00		
S_{comp}	Between Groups	6,6265E-03	1	6,6265E-03	22,986	$4,392 \cdot 10^{-06}$
	Within Groups	3,7476E-02	130	2,8828E-04		
	Total	4,4103E-02	131	0,0000E+00		
A_{hull}	Between Groups	5,8115E+11	1	5,8115E+11	14,187	0,000
	Within Groups	5,3252E+12	130	4,0963E+10		
	Total	5,9064E+12	131	0,0000E+00		
P_{hull}	Between Groups	7,9184E+05	1	7,9184E+05	29,600	$2,545 \cdot 10^{-07}$
	Within Groups	3,4776E+06	130	2,6751E+04		
	Total	4,2695E+06	131	0,0000E+00		
S_{ecd}	Between Groups	1,2760E+05	1	1,2760E+05	30,430	$1,798 \cdot 10^{-07}$
	Within Groups	5,4513E+05	130	4,1933E+03		
	Total	6,7273E+05	131	0,0000E+00		
P	Between Groups	4,6276E+06	1	4,6276E+06	13,062	0,000
	Within Groups	4,6057E+07	130	3,5428E+05		
	Total	5,0685E+07	131	0,0000E+00		
A_{norm}	Between Groups	2,3377E+04	1	2,3377E+04	27,632	$5,854 \cdot 10^{-07}$
	Within Groups	1,0998E+05	130	8,4602E+02		
	Total	1,3336E+05	131	0,0000E+00		

16. táblázat. Karcnyom detektálás megbízhatóságának mérése

Pontosság	Precizitás	Szenzitivitás	Specificitás
0,987	0,958	0,981	0,981
0,981	0,942	0,973	0,973
0,991	0,983	0,982	0,982
0,991	0,980	0,979	0,979
0,989	0,966	0,976	0,976
0,987	0,956	0,978	0,978
0,986	0,966	0,959	0,959
0,985	0,958	0,964	0,964
0,984	0,959	0,967	0,967
0,981	0,952	0,934	0,934
0,990	0,978	0,979	0,979
0,991	0,981	0,971	0,971
0,988	0,984	0,960	0,960
0,991	0,980	0,980	0,980
0,990	0,967	0,980	0,980
0,989	0,963	0,977	0,977
0,990	0,972	0,965	0,965
0,988	0,988	0,950	0,950
0,990	0,980	0,950	0,950
0,986	0,998	0,926	0,926
0,990	0,990	0,959	0,959
0,988	0,971	0,974	0,974
0,991	0,991	0,970	0,970
0,991	0,990	0,969	0,969
0,993	0,984	0,982	0,982
0,992	0,985	0,977	0,977
0,990	0,993	0,965	0,965
0,990	0,986	0,969	0,969
0,992	0,990	0,970	0,970
0,993	0,987	0,969	0,969
0,993	0,988	0,978	0,978
0,991	0,989	0,965	0,965
0,987	0,979	0,972	0,972
0,989	0,985	0,957	0,957
0,992	0,988	0,973	0,973
0,992	0,987	0,974	0,974
0,992	0,984	0,965	0,965
0,988	0,992	0,956	0,956
0,979	0,991	0,904	0,904
0,991	0,987	0,978	0,978
0,965	0,988	0,911	0,911
0,984	0,984	0,957	0,957
0,977	0,976	0,947	0,947
0,987	0,987	0,970	0,970
0,981	0,977	0,952	0,952
0,974	0,984	0,895	0,895
0,984	0,989	0,834	0,834
0,963	0,992	0,866	0,866
0,986	0,995	0,954	0,954
0,980	0,995	0,924	0,924

B. Függelék: Publikációs lista

Idegen nyelvű folyóiratcikkek

- [J1] J. Bedekovics, Sz. Szeghalmy, L. Beke, A. Fazekas, G. Méhes: Image analysis of platelet derived growth factor receptor-beta (PDGFR β) expression to determine the grade and dynamics of myelofibrosis in bone marrow biopsy samples. *Cytometry Part B: Clinical Cytometry*, 86. évf. (2014) 5. sz., 319–328. p.
- [J2] M. B. Maros, A. Fazekas, P. Barkóczy, Sz. Szeghalmy, Zs. Koncsik: Qualifying glass surfaces by scratch test with integrated image processing. *Key Engineering Materials*, 409. évf. (2009), 267–274. p.
- [J3] Sz. Szeghalmy, P. Barkóczy, M. B. Maros, A. Fazekas, Cs. Póliska: A new technique for characterization of residual stresses in glass surfaces: scratch test completed with image analysis. *Materials Science Forum*, 589. évf. (2008), 275–280. p.
- [J4] Sz. Szeghalmy, J. Bedekovics, G. Méhes, A. Fazekas: Digital measurement of myelofibrosis associated platelet derived growth factor receptor β (PDGFR β) expression in bone marrow biopsies. *Journal of Computing and Information Technology*, 21. évf. (2013) 1. sz., 49–58. p.

Egyéb közlemények

- [O1] A. Fazekas, Sz. Szeghalmy, K. Bertók, L. Sajó: Multi-modális ember-gép kapcsolatok. In *KÉPAF 2011*. 2011, 387–392. p.

- [O2] A. Mátyás, G. Szemán Nagy, Sz. Szeghalmy: Time-lapse felvételek elemzése fonalagomba növekedésének vizsgálatához. In *Informatika a felsőoktatásban 2014, Debrecen* (konferenciaanyag). 2014, Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, 295–301. p.
- [O3] K. Pápay, Sz. Szeghalmy, I. Szekrényes: Hucomtech multimodal corpus annotation. *Argumentum*, 7. évf. (2011), 330–347. p.
- [O4] Szeghalmy Sz., M. Zichar: 3d topológia felépítésének és elemzésének lehetőségei. In *Informatika a felsőoktatásban 2008, Debrecen* (konferenciaanyag). 2008, Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, 227–233. p.
- [O5] P. É. Szalay, Sz. Szeghalmy, O. Kis, L. J. Szabó, M. Miskolczi, A. Fazekas, Gy. Dévai: A sávós szitakötő [*calopteryx splendens* (harris, 1782)] konyári-kállói imágópopulációjának morfometriai elemzése. *Studia odonotol. hung.*, 17. évf. (2015), 23–44. p.
- [O6] P. É. Szalay, Sz. Szeghalmy, O. Kis, Miskolczi M. Fazekas A. Dévai Gy. Szabó, L. J.: Alapadatok a sávós szitakötő [*calopteryx splendens* (harris, 1782)] konyári-kállói imágópopulációjának morfometriai elemzéséhez. *Studia odonotol. hung.*, 15. évf. (2013), 9–26. p.
- [O7] P. É. Szalay, Sz. Szeghalmy, L. J. Szabó, M. Miskolczi, A. Fazekas, Gy. Dévai: Comparative morphometric analysis of two hungarian *calopteryx splendens* population based on male wing traits. In *32. Jahrestagung der Gesellschaft deutschsprachiger Odonatologen (GdO e.V.)*. 2013, 70–71. p.
- [O8] Sz. Szeghalmy: Gráf-vágás alapú szegmentálás. In *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában IV. : Térinformatika Konferencia és Szakkiállítás* (konferenciaanyag). 2013, Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 429–436. p.

- [O9] Sz. Szeghalmy, Zs. Koncsik, M. B. Maros, A. Fazekas, P. Barkóczy: Üvegfelületek elemzése képelemző módszerrel kiegészített karcvizsgálattal. In *KÉPAF 2009*. 2009, 144–153. p.
- [O10] Sz. Szeghalmy, P. É. Szalay, Gy. Dévai, A. Fazekas, O. Kis, L.J. Szabó, Miskolczi M.: Szitakötőszárnyak elemzése. In *KÉPAF 2013*. 2013, 542–549. p.
- [O11] Sz. Szeghalmy, H. Tomán, A. Hajdu: Detecting digital intersections using line approximation. In *8th International Conference on Applied Informatics, Eger* (konferenciaanyag). 193–202. p.
- [O12] Sz. Szeghalmy, M. Zichar, A. Fazekas: Comfortable mouse control using 3D depth sensor. In *IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2013* (konferenciaanyag). 2013, IEEE, 219–222. p.
- [O13] Sz. Szeghalmy, M. Zichar, A. Fazekas: Gesture-based computer mouse using kinect sensor. In *5th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2014* (konferenciaanyag). 2014, IEEE, 419–424. p.
- [O14] M. Zichar, Sz. Szeghalmy: Network topology in 3D GIS. In *8th International Conference on Applied Informatic, Eger* (konferenciaanyag). 2010, 211–219. p.