



# Márványmintázatok felismerése képfeldolgozó algoritmusok segítségével

**Barancsuk Lilla**

Konzulens:

**Dr. Csorba Kristóf**

Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék

**Tudományos Diákköri Konferencia**

**2014**

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>2</b>
1.1. Márványosztályozási módszerek . . . . .	2
1.2. A teljes kutatási projekt . . . . .	3
1.3. A dolgozat célkitűzése . . . . .	4
<b>2. Kontúrkeresés, előfeldolgozás</b>	<b>6</b>
2.1. Gyakran használt, egyszerűbb képfeldolgozó algoritmusok . . . . .	6
2.1.1. Erózió, dilatació . . . . .	6
2.1.2. Lyukak eltávolítása . . . . .	6
2.1.3. Invertálás . . . . .	6
2.1.4. Connected component analysis . . . . .	7
2.1.5. Vázkijelölés - skeleton . . . . .	7
2.2. Adaptive double threshold segmenter . . . . .	8
2.2.1. Az algoritmus működése . . . . .	8
2.2.2. Az algoritmus értékelése . . . . .	10
<b>3. A szemcsemeghatározás pontosítására használt módszerek</b>	<b>11</b>
3.1. Szemcsék összeolvadásának szűrése . . . . .	11
3.1.1. Szűkületkeresés . . . . .	12
3.1.2. Vonalvégződés összekötése ellipszis alapú távolságfüggvénnyel . . . . .	15
3.2. Szemcsék szétesésének szűrése . . . . .	19
3.2.1. Ikerkristályosodás . . . . .	20
3.2.2. Ikerkristályok azonosítása alak alapján . . . . .	21
3.2.3. Ikerkristály-vonalak azonosítása gráfalgoritmusokkal . . . . .	24
<b>4. Összefoglalás</b>	<b>27</b>
4.1. Eredmények, értékelés . . . . .	27
4.2. Kitekintés . . . . .	27

# 1. fejezet

## Bevezetés

A természettudósok már régóta foglalkoznak márványok leírásával, ásványtani, kőzettani, kémiai és kőzetmechanikai szempontból. A kőzet eredetének ismeretére több területen is, mint pl. régészet és műemlékvédelem felmerült az igény, hiszen ennek segítségével következtethetünk például antik épületek köveinek származására, illetve arra, hogy mely kőbányák voltak aktívak bizonyos történelmi időszakokban. Ezek további következtetésekhez vezethetnek, adott korban jellemzően használt márványfajtákra, ebből elsüllyedt márványszállítmányok korára, de műemléképületek építésének idejére is. A márvány eredetének ismerete feltétlenül szükséges a kőzetből készült szobrok restaurálásához, kiegészítéséhez is, így szerepet tölt be a kulturális örökség megőrzésében, valamint számos műtárgy eredetének vizsgálatához is elengedhetetlen az alapanyagul szolgáló kő típusának ismerete.



1.1. ábra. Az ókori Trója romjai.

Az 1.1. ábrán az ókori Trója romjai láthatók, amelyek között változatos márványleleteket találtak, a neolitikumtól a római császárság koráig. A kutatásunkhoz használt márványokról készült vékonycsiszolati képek között számos, innen előkerült minta is megtalálható.

### 1.1. Márványosztályozási módszerek

A márványok osztályozására és eredetvizsgálatára korábban már több különböző természettudományi módszert is kidolgoztak [12].

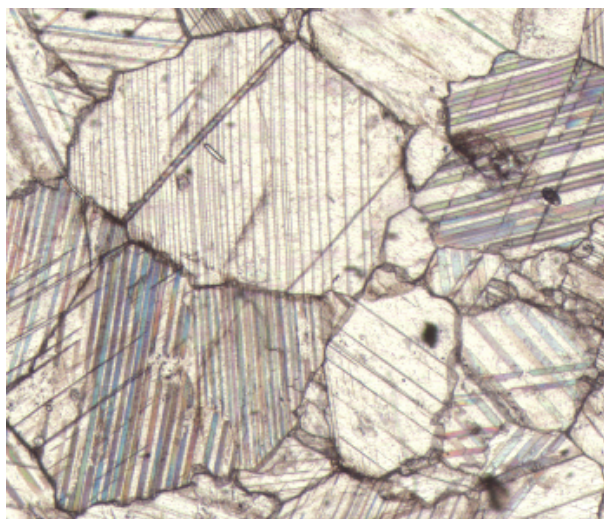
E módszerek egy része a márvány külső, szabad szemmel látható tulajdonságait – például annak színét – használja fel a típusmeghatározásra.

Más analitikai megközelítések a kőzet ásványtani összetételének, kémiai, fizikai tulajdonságainak vizsgálatán alapulnak. Egyik leggyakrabban használt módszer az márványban megtalálható elemek (szén, oxigén, stroncium) izotóparányainak meghatározása. Ilyenek például a stroncium izotóp koncentrációjának, illetve a ritkaföldfémek mennyiségének elemzése [9, 4].

Egy másik, geológusok által gyakran használt eredetmeghatározási módszer a vékonycsiszolatokból nyerhető adatokon alapul. Ezen vizsgálatok alapjául a kőzetből kivágott megközelítőleg 30  $\mu\text{m}$  vastagságú vékonycsiszolatok szolgálnak. A létrejött mintát a kutatók mikroszkóp alatt vizsgálják, és rögzítik a nagyított képet.

Az 1.2. ábrán például egy ilyen, mikrofilmszkennerrel fotografált jellegzetes márványminta látható. A képen jól elkülöníthetők a kőzetet felépítő *kalcitszemcsék*. E néhány milliméter átmérőjű, elemi kalcit kristályok tulajdonságai (alak, méret, orientáció) jellemzőek az adott márványtípusra, és jó alapjai az osztályozásnak.

A kutatók eddig jellemzően a szemcsék legnagyobb átmérőjét illetve átlagos méretét mérték, és ez alapján sorolták be az ásványokat [11, 6, 7].

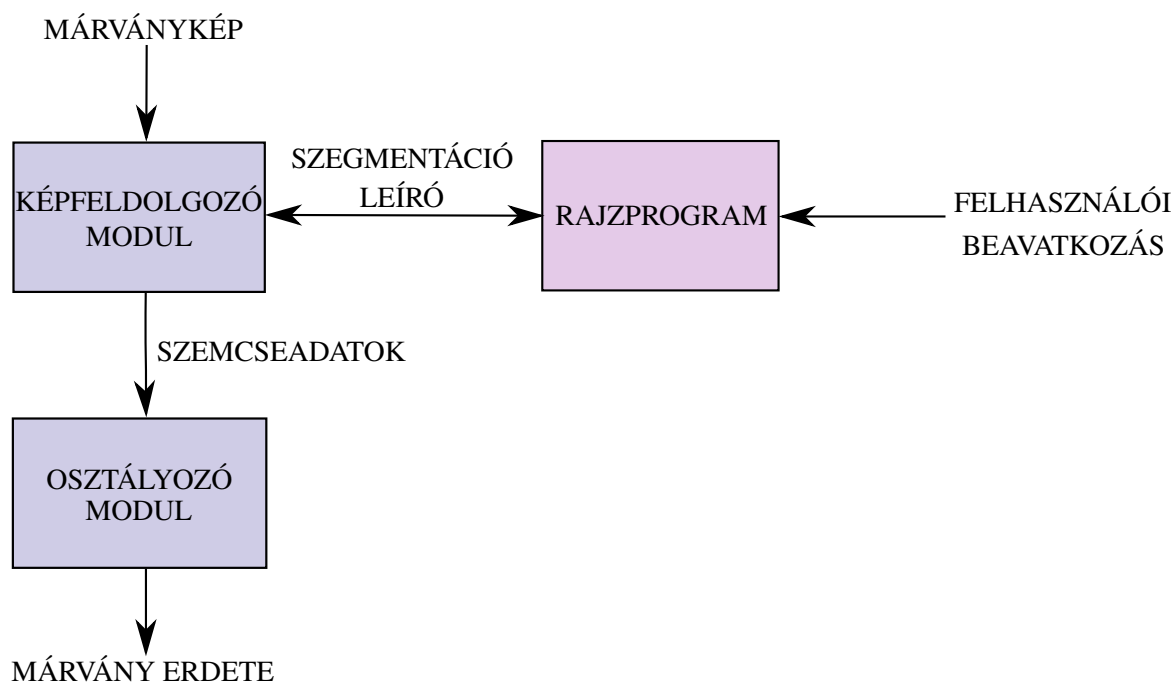


1.2. ábra. Vékonycsiszolati kép.

Kutatásomban én is vékonycsiszolatok elemzésével foglalkozom. Céлом a képek feldolgozásának automatizálása. A márványképek számítógéppel végzett osztályozására eddig még nem volt példa. Ennek legfőbb oka, hogy a kalcitszemcsékben megtalálható ikerkristályok az automatikus „átrajzolást” szinte lehetetlenné tették. Azonban a gépi módszer számos előnnyel jár. Ezt a hosszadalmas munkát az automatizálás hatására felváltják a szegmentáló algoritmusok, amelyek futási ideje a kézi rajzos megoldáshoz képest csekély, ezzel egy kép átfutási ideje figyelemreméltóan lecsökken. Korábban az egyszerűség végett a szemcsék jellemzésére globális adatokat (például legnagyobb szemcseátmérő) és átlagértékeket (közepes szemcseterület) használtak. Az automatizálás azonban lehetővé teszi nemcsak nagy számú mintasorozatok vizsgálatát, hanem nagy mennyiségű adat tárolását és feldolgozását is. Az általam javasolt módszer eredménye tehát egy gyorsabb és precízebb osztályozás.

## 1.2. A teljes kutatási projekt

Jelen munka része egy geológusok kezdeményezésére létrejött nagyobb projektnek. Célunk egy, a kutatókat segítő olyan program létrehozása, amely a bevitt csiszolati képek (a továbbiakban: márványképek) hatékony osztályozására képes.



1.3. ábra. Az interaktív osztályozó program felépítése.

A megvalósítandó program három fő része az 1.3. ábrán látható. A képfeldolgozó modul feladata a márványképek szegmentálása, azaz a szemcsék minél jobb elkülönítése, szétválasztása. Az így kapott, előfeldolgozott szemcsék szemmel látható hibáit (például összeolvadt vagy feldarabolódott szemcseserajzolat) a felhasználó egy speciális rajzprogram segítségével akár több egymást követő szegmentációs-korrektíós lépésben javíthatja. A felhasználó által megfelelőnek talált szegmentálásból a program egy adathalmazt generál, amely a szemcsék fontosabb jellemzőit tartalmazza. (Ezek a tulajdonságok az osztályozás szempontjából releváns, jellegzetes értékek, mint a szemcsék mérete, színe, elhelyezkedése, orientációja.) A kapott adatokat az osztályozó modul dolgozza fel, amely eredet szerint sorolja be a márványt.

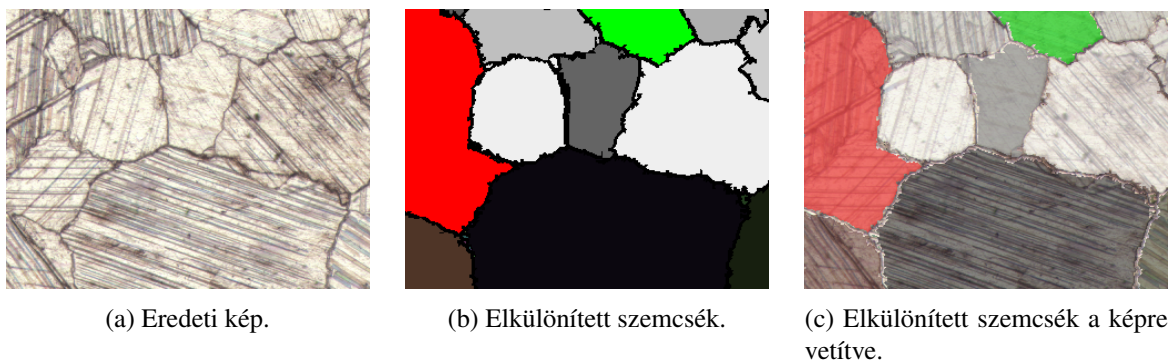
A projekt távlati célkitűzése a teljes automatizálás, ami a külső felhasználói beavatkozás elhagyását jelenti. Ez a lépés felgyorsítja a folyamatot, azonban megköveteli a gépi szegmentálás pontosságát, hiszen ekkor megszűnik a külső ellenőrzés lehetősége. Vizsgálódásainkhoz egy több mint 3000 márványmintát tartalmazó adatbázis [13], valamint 60 különböző vékonycsiszolati kép áll rendelkezésünkre.

### 1.3. A dolgozat célkitűzése

Munkám a projekt automatizált képfeldolgozással kapcsolatos részébe illeszkedik. Fő célom a márványt felépítő szemcsék elkülönítése a szkennelt vékonycsiszolati képeken szegmentáló algoritmusok segítségével. A szemcsék kiválasztását akkor tekintem pontosnak, ha azok illeszkednek a képen szabad szemmel látható kalcitszemcsékre, ahogy az az 1.4. ábrán látható. Az elkülönítés a teljes folyamat fontos lépése, hiszen ennek segítségével nyerjük ki az osztályozáshoz szükséges adatokat. A kalcitszemcsék tökéletes meghatározása azonban nem egzakt feladat. A szemcsék szabad szemmel történő elkülönítése szubjektív, egyénenként változó eredményeket ad. Ezek az esetleges különbségek azonban olyan csekélyek, hogy az osztályozást nem befolyásolják. Célom ezért a szemcsék jó közelítése, ami azután a felhasználó külső beavatkozásával tovább javítható.

Dolgozatomban részletesen bemutatom, hogy milyen képfeldolgozó módszerek segítségével valósít-

ható meg a kalciumszemcsék precíz elkülönítése.



1.4. ábra. A szemcsék elkülönítésének várt ideális eredménye.

Munkám 2. fejezetében beszámolok arról, hogy mely általános célú algoritmusok a legeredményesebbek az előfeldolgozásban. Bemutatom az általam használt kontúrkereső módszert, ezenkívül áttekintést adok a feldolgozáshoz használt kiegészítő műveletekről is.

A 3. fejezetben ismertetem az előfeldolgozás után adódó problémákat, illetve ezek megoldásának lehetőségeit.

A hibák javítása olyan saját algoritmusokkal történik, amelyek támaszkodnak a márványképekről meglévő előzetes ismereteinkre, azaz az *a priori* információkra, ezzel javítva az eredmény minőségét. A 3.1. alfejezetben a talált szemcsék összeolvadásának problémájával foglalkozom. Beszámolok arról, milyen módszerek segítségével azonosíthatók a szemcsék közti szűk rések, és hogyan szüntethetők meg. A 3.2. alfejezetben a szemcsék szétesésének helyreállítására javasolok több módszert. Részletezem, hogyan okozza a széttöredezést az ikerkristályosodás folyamata. Ismertetem, hogy alakjuk alapján hogyan szűrhetők ki az így keletkezett ikerkristályok, továbbá hogy milyen módon egyesíthetők az emiatt feldarabolódott szemcsék részletei.

Az általam javasolt algoritmusok mindegyikénél beszámolok arról is, hogyan teszteltem azt egy C++ nyelven, az OpenCV osztálykönyvtár felhasználásával készült program segítségével.

A 4. fejezetben részletezem eredményeimet, és beszámolok a márványok osztályozására vonatkozó további terveimről.

## 2. fejezet

# Kontúrkeresés, előfeldolgozás

A szemcsék elkülönítésének első szakaszában a durva, viszonylag pontatlan szemcserajzolat meghatározása a cél, ami később tovább javítható. Ennek oka, hogy tapasztalatom szerint a hagyományos szegmentáló algoritmusok nem adnak precíz eredményt a márványképek esetében. Az így kapott kimenet azonban jó kiindulási alapja egy további, márványképekre specializálódott feldolgozásnak. Ebben a fejezetben az előfeldolgozáshoz használt legjobb kontúrkereső algoritmus, az *adaptive double threshold segmenter* működését részletezem, és áttekintést adok azokról az egyszerű műveletekről, melyeket sok esetben használtam a tesztelés során.

### 2.1. Gyakran használt, egyszerűbb képfeldolgozó algoritmusok

#### 2.1.1. Erózió, dilatáció

Az erózió és dilatáció (2.1. ábra) gyakran alkalmazott morfológiai műveletek, amik a márványképeken is képesek a kinyert szegmentálás gyors, de nem pontos javítására. Segítségükkel kisebb hibák tüntethetők el, azonban a tökéletes eredmény eléréséhez bonyolultabb algoritmusokra van szükség. A dilatáció hatására például a néhány pixel távolságú rések megszűnnek, mint a 2.1e. ábrán látható.

#### 2.1.2. Lyukak eltávolítása

A szemcsék azonosítása sokszor azért pontatlan, mert a kinyert régiókban több, kisebb lyuk keletkezik a feldolgozás során. Ezek a futtatott algoritmusok jellegéből adódnak, és egyszerűen eltávolíthatók. Az eltávolítás lényege, hogy az algoritmus a környezetbe olvasztja azokat a pixelcsoportokat, amelyeket minden oldalról a szegmentálást alkotó képpontok vesznek körül. A lyukak eltávolításával információt veszítünk, azonban a szemcsemeghatározás minősége javul. Lyukak eltávolítására a 2.2. ábrán látható példa.

#### 2.1.3. Invertálás

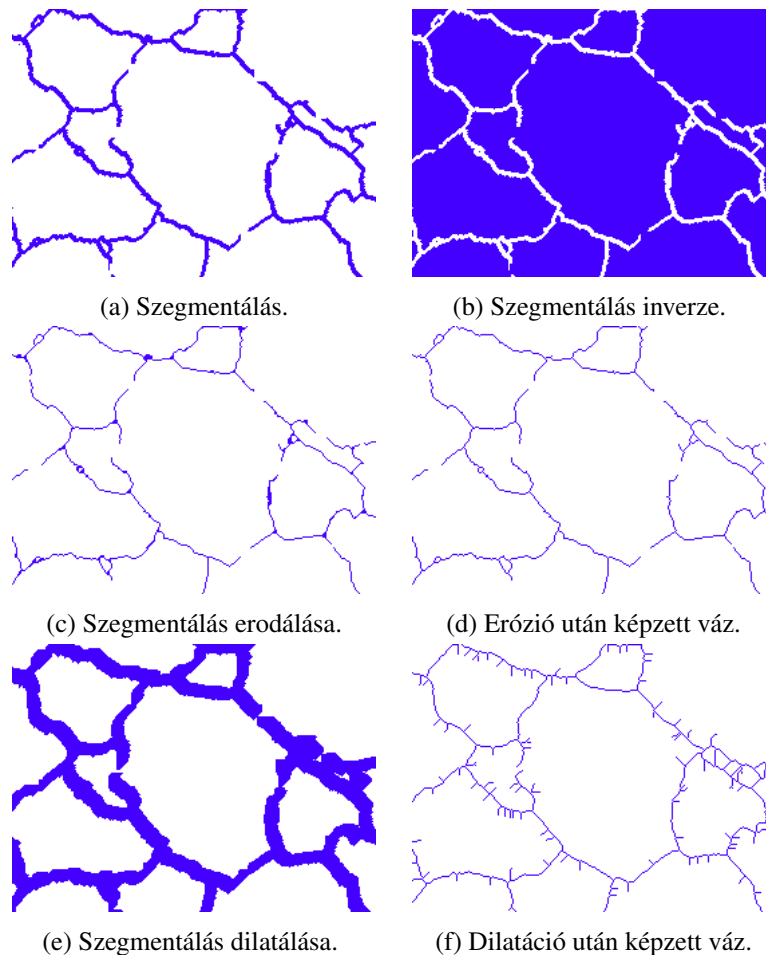
A márványképeken a szegmentálás által kiválasztott pixelek fedhetik a szemcséket magukat, de a szemcsehatárokat is. Ideális esetben ez a két halmaz egymás komplementere a teljes képre nézve. Amennyiben a szemcsehatárokból szeretnénk közelítőleg meghatározni a szemcséket fedő pixeleket, invertáljuk a kiválasztott pixelek teljes halmazát, mint a 2.1b. ábrán látható.

#### 2.1.4. Connected component analysis

A *connected component analysis* (összefüggőségi vizsgálat) célja az összefüggő (egymással szomszédos képpontokból álló) pixelcsoportok elkülönítése a szegmentálásban [3]. Az algoritmus futása után a szegmentálás összefüggő részei önálló halmazokba kerülnek, ami lehetővé teszi ezek egyenkénti feldolgozását. A *connected component analysis* futási eredménye a 2.2c. ábrán látható, ahol az összetartozó pixelcsoportokat eltérő színek jelzik.

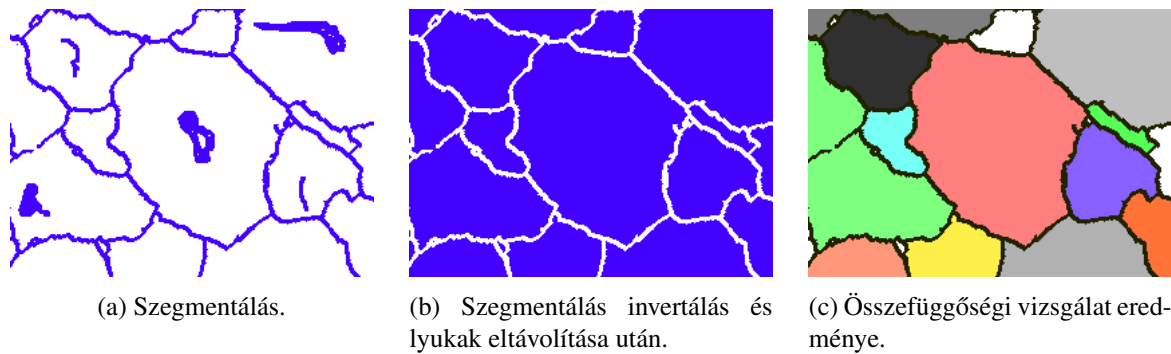
#### 2.1.5. Vázkijelölés - skeleton

A váz meghatározása (2.1. ábra) nagy jelentőséggel bír a márványképek feldolgozás során. A skeleton ugyanis mindenütt egy pixel széles, azaz könnyen kezelhető és sokféle művelet elvégzését teszi lehetővé, amit egy hagyományos szegmentálás nem. A tesztprogram a távolság-transzformáció alapú vázkijelölést használja [8].



2.1. ábra. Morfológiai algoritmusok és vázképzés szemléltetése. A szegmentálást alkotó, kiválasztott képpontokat kék szín jelöli.



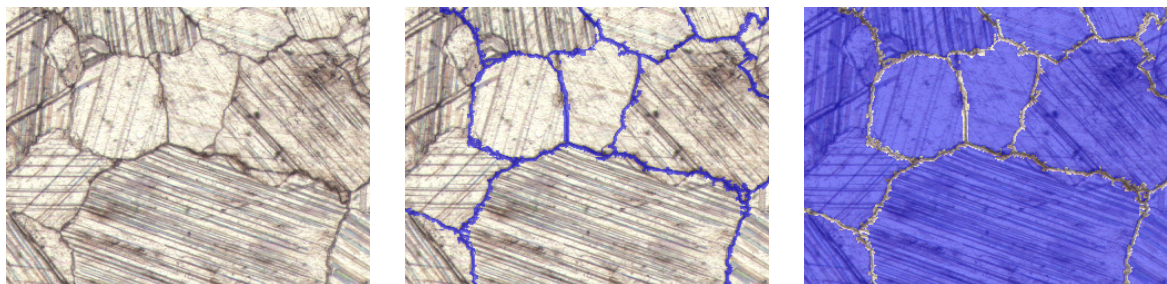


2.2. ábra. Lyukak eltávolítása, összefüggőségi vizsgálat.

## 2.2. Adaptive double threshold segmenter

Az előfeldolgozás szerepe, hogy a szemcséket nagy vonalakban azonosítsuk, ezzel a további feldolgozáshoz adatokat nyerjünk ki.

A válogatás egyik lehetséges módja, ha a szemcsehatárokhoz tartozó pixeleket gyűjtjük össze először (ezek kerülnek a "szemcsehatár" halmazba). Ezután alakulnak ki a szemcsék összefüggő ponthalmazok formájában, ahogy az a 2.3. ábrán látható. Ez még nem felel meg várakozásainknak, hiszen nincs szemcsékre különítve, de a halmaz szétválasztásáról *connected components analysis* futtatásával gondoskodhatunk. Így jutunk hozzá a végeredményhez.



2.3. ábra. Az előfeldolgozás alap gondolata.

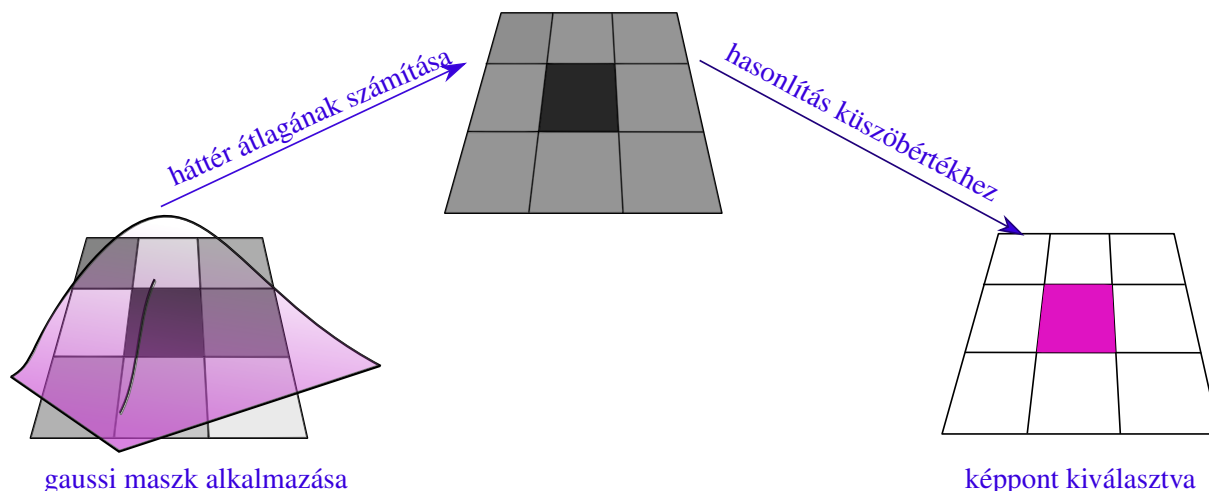
A szemcsehatárok kiválasztása jó megoldás, hiszen ezeket a háttérnél jól láthatóan sötétebb, könnyen elkülöníthető pixelek alkotják. Célunk egy olyan algoritmus, amely a képpontokat a környező háttér színéhez képest szelektálja. Erre a célra már több megoldás született a képfeldolgozásban. Munkámban az általam legjobbnak ítélt módszert, az *adaptive double threshold segmenter* algoritmust részletezem.

### 2.2.1. Az algoritmus működése

Az *adaptive double threshold segmenter* (a továbbiakban: ADTS) az ún. *adaptive threshold segmenter* és a *double threshold segmenter* algoritmusok egyszerre történő alkalmazását jelenti. A következő szakaszban e két szegmentáló működését részletezem.

## Adaptive threshold segmenter

Az *adaptive threshold segmenter* (adaptív küszöbérték-szegmentáló, a továbbiakban: ATS) felelős az ADTS alkalmazása során a kellően sötét pixelek kiválasztásáért [2]. Az algoritmus vázlatos működése egyetlen képpontra a 2.4. ábrán látható.



2.4. ábra. Az adaptive threshold segmenter vázlatos működése egyetlen pixelre.

A módszer adaptivitását annak köszönheti, hogy a képen helytől függően állapítja meg a küszöbértéket, amihez az adott pont színintenzitását hasonlítja. Ennek következménye, hogy bár az árnyalatok pontról pontra változnak a képen, az algoritmus képes a háttérből "kilógó" képpontokat megtalálni. A küszöbértéket a pixel környezetének (háttérének) Gauss-függvénnyel súlyozott átlagából számítjuk a következő formula segítségével:

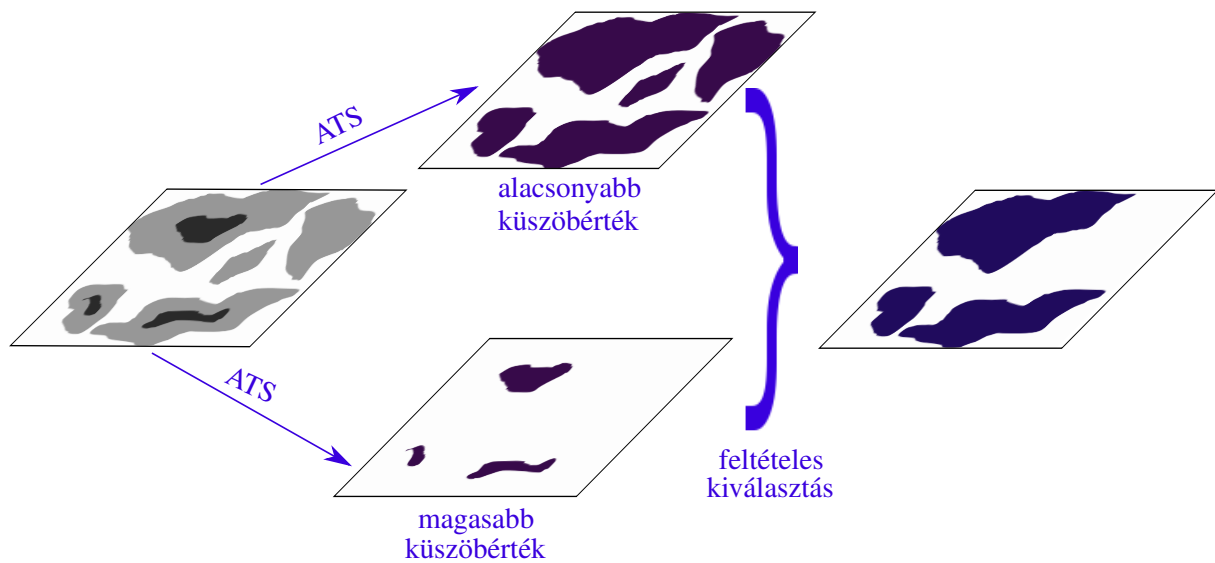
$$T(x, y) = G(x, y) \star I(x, y) - C,$$

ahol  $T(x, y)$  a helytől függő küszöbérték,  $I(x, y)$  a kép pixelértékeit,  $G(x, y)$  a kétdimenziós Gauss-függvény mintáit tartalmazza egy adott nagyságú ablakban,  $\star$  pedig a kétdimenziós konvolúció műveletét jelenti. A  $C$  konstans tetszőlegesen választható, és meghatározza a küszöbérték szigorúságát. Amennyiben a vizsgált képpont sötétebb a küszöbnél, a "kiválasztott" halmazba kerül.

## Double threshold segmenter

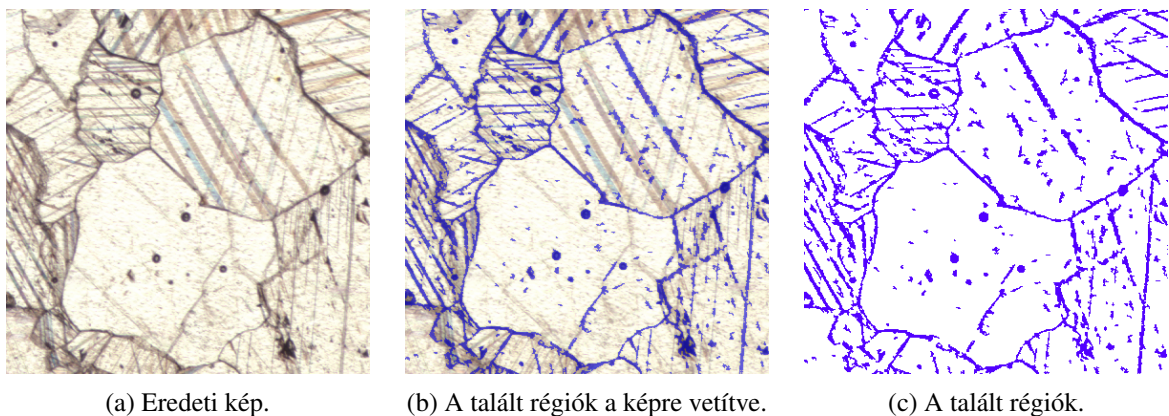
A *double threshold segmenter* (kettős küszöb-szegmentáló, a továbbiakban: DTS) feladata a már megtalált pixelcsoportok további szűrése.

Az algoritmus vázlatos működése a 2.5. ábrán látható. A kettős küszöb ebben az esetben az *adaptive threshold segmenter* két alkalommal történő futtatását jelenti különböző küszöbértékekre. *Connected component analysis* követően a két képen egymást fedő diszjunkt pixelcsoportokat kapunk. Az alacsonyabb küszöbérték nagyobb régiókat eredményez, hiszen legalább annyi képpontra teljesül a feltétel, mint magasabb küszöb esetén. E régiók közül a következő lépésben néhányat eldobunk. A kiválasztás alapját a szigorúbb feltételek mellett keletkezett pixelcsoportok jelentik [10]. Azokat a régiókat tartjuk meg az alacsonyabb küszöbértékkel kiválasztottak közül, melyek tartalmaznak kisebb, magasabb küszöbértékkel kiválasztott régiókat. Az eredmény így olyan ponthalmazokat tartalmaz, amelyek között sötétebb pixelek is biztosan megtalálhatóak.



2.5. ábra. A double threshold segmenter vázlatos működése.

### 2.2.2. Az algoritmus értékelése



2.6. ábra. Az ADTS futási eredménye.

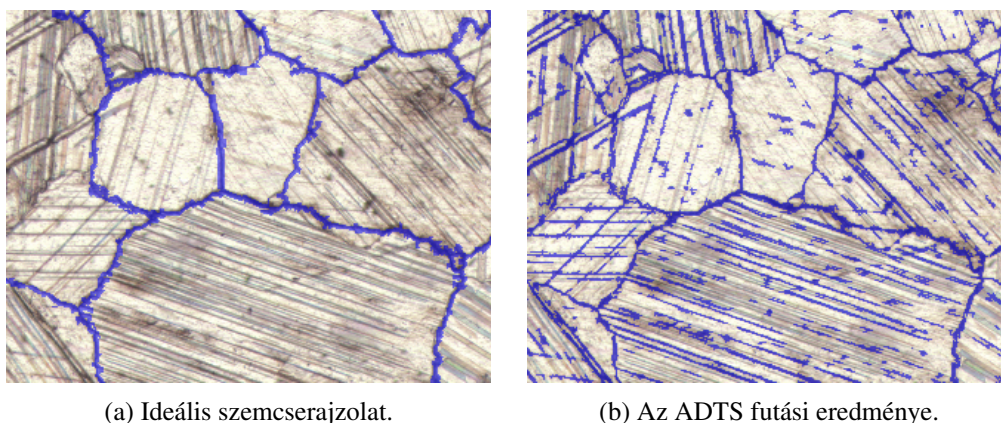
Az *adaptive double threshold segmenter* azért bizonyult kiemelkedőnek az általam tesztelt más kontúrkereső algoritmusok (Canny, Maximally Stable Extremal Regions) között, mert kihasználja a szemcsehatárok speciális tulajdonságait. A határok jellemzője, hogy márványképen látható többi régióhoz képest mélyebb árnyalatú pixeleket is tartalmaznak, ahogy az a 2.6. ábrán jól megfigyelhető. Az algoritmus további eredményként nem csak e kiemelkedően sötét pixeleket adja vissza, hanem az egész régiót, amelyben ezek megtalálhatóak. Így lehetőség van a teljes határterület kinyerésére.

A kapott pixelcsoportok jól követik a szemcsehatárok rajzolatait, de sok más olyan régiót is visszakupunk, amelyek szemmel láthatóan nem tartoznak szemcsehatárokhoz. E hibák korrigálására kidolgozott módszereimet a következő fejezetekben ismertetem.

## 3. fejezet

# A szemcsemeghatározás pontosítására használt módszerek

Ahogy az előzőekben ismertettem, az előfeldolgozás után a kapott szemcsék nem pontosan illeszkednek az általunk látott tökéletes eredményhez. Az ideális kimenet és az ADTS utáni állapot különbsége a 3.1. ábrán jól látható. Az algoritmus helyenként nem ismeri fel a szemcsehatárokat, és sok más régiót is megtalál a vártakon kívül. Ebben a fejezetben részletezem azokat az algoritmusokat, melyek alkalmasak az így kialakult hibák kijavítására, az eredmények tökéletesítésére.



(a) Ideális szemcserajzolat.

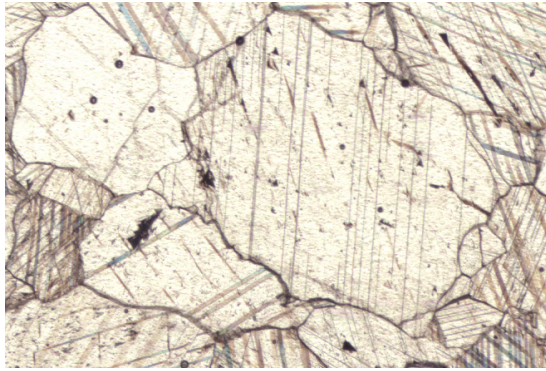
(b) Az ADTS futási eredménye.

3.1. ábra. Az előfeldolgozás okozta hibák az ideális szemcserajzolathoz képest.

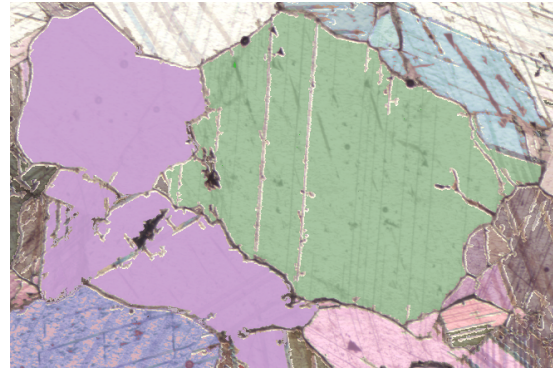
### 3.1. Szemcsék összeolvadásának szűrése

A kontúrkeresés és az invertálás után kialakuló szemcserajzolat egyik jól látható hibája, hogy bizonyos régiók több szemcsét is lefednek, mint a lilával jelölt a 3.2. ábrán.

Ennek oka, hogy az ADTS futtatása után a kapott pixelcsoportok nem alkotnak összefüggő körvonalat, így invertáláskor a keletkezett szűk réseken keresztül a régiók összekapcsolódnak. Mivel egy régiónak egyetlen szemcséhez kellene tartoznia, ezért ez a fajta szemcserajzolat nem a valóságnak megfelelő adatokat generál, és az osztályozás hibáját is okozhatja, így szükséges az összeolvadt szemcsék szétválasztása. A szétválasztás egyik lehetséges módja a köztes rések azonosítása és megszüntetése. Ebben a fejezetben az erre alkalmas módszereket ismertetem.



(a) Eredeti kép.

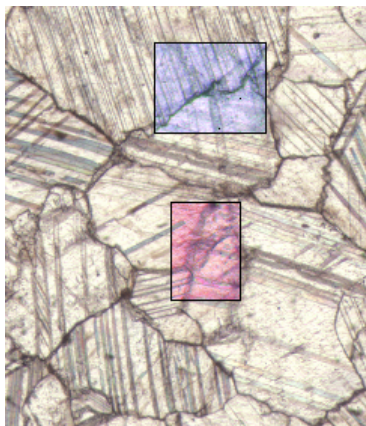


(b) Talált régiók a képre vetítve. A lila terület hibásan két szemcsét is lefed

3.2. ábra. Szemcsék hibás összeolvadása.

### 3.1.1. Szűkületkeresés

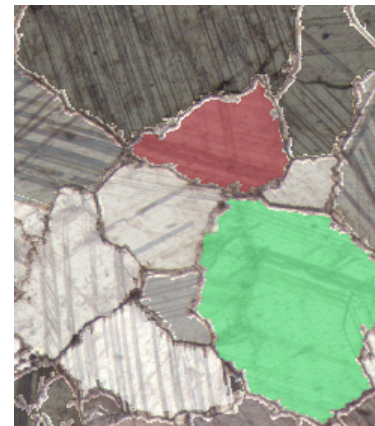
A fent említett hibákat az általunk talált szemcsehatárokon lévő szakadások okozzák. A szakadások oka, hogy a határok bizonyos szakaszokon nem elég sötét színűek ahhoz, hogy az őket alkotó pixeleket az ADTS kiválassza. A 3.3. ábrán a szemcsék összeolvadásának jellegzetes példája látható a várt ideális szemcserajzolattal, és az összeolvadást okozó határszakadásokkal. Ezek a rések általában nagyon rövidek, és az invertálás után a két összeolvadt szemcse közti szűk átjáró, ún. szűkület formájában jelennek meg. Ebben a szakaszban e szűkületek azonosításának és megszüntetésének módját ismertetem.



(a) Eredeti kép.



(b) Talált hibásan összeolvadt szemcsék.



(c) Ideális szemcserajzolat.

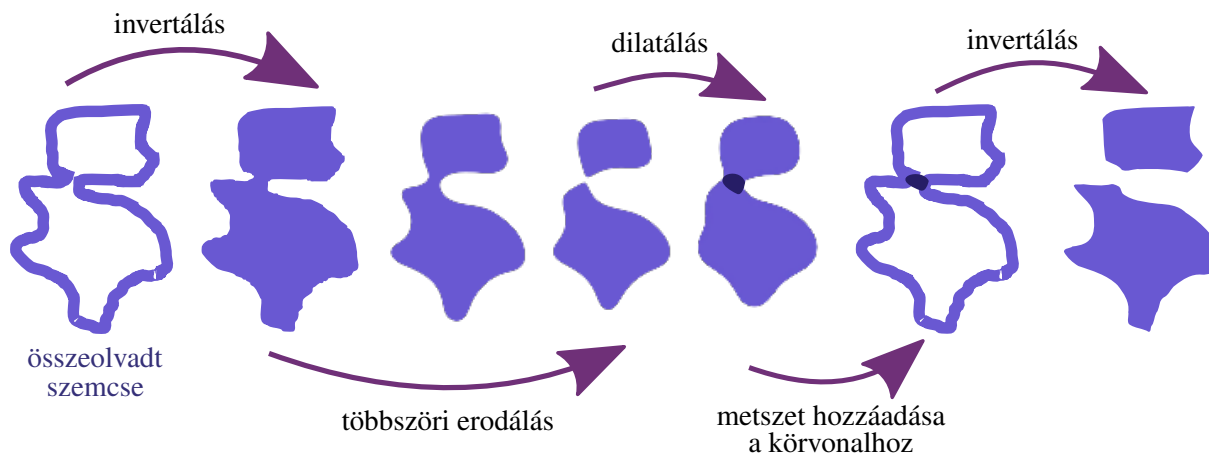


(d) A fent kijelölt szakadások.

3.3. ábra. Szakadások okozta hibás szemcseösszeolvadás.

## Szűkületkeresés morfológiai algoritmusokkal

A morfológiai algoritmusokkal végzett szűkületdetektálás vázlatos működése a 3.4. ábrán látható. A módszer alapja, hogy mivel a szűkületek többsége vékony átjáró a szemcsék között, a talált régiókat folyamatosan erodálva a szemcsék az összeolvadás helyén két nagyobb darabra esnek szét.



3.4. ábra. Morfológiai szűkületkeresés vázlatosan.

A szétesés detektálásával a szűkületek helye is meghatározható. Ehhez közvetlenül a szétesés után a régió két felét megnövelve (dilatálva), és az így kapott halmazok metszetét véve látszik, hogy mely tartományon vált ketté a szemcse. A metszetet hozzáadva a szemcsehatárhoz zárhatjuk a körvonalat.

### Az algoritmus értékelése

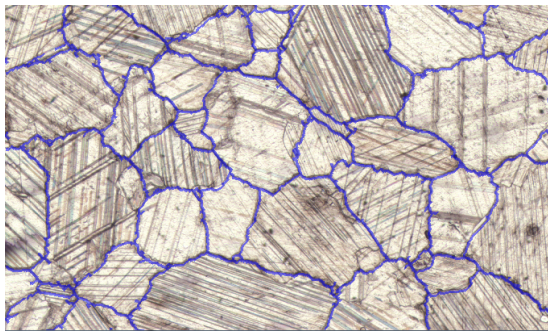
Az előzőekben ismertetett morfológiai módszer sok esetben megtalálja a keresett szűkületeket. A 3.5. ábrán jól látható a különbség az eredeti, nagy mértékben összeolvadt és a morfológiai algoritmussal szétválasztott szemcserajzolat között.

Az algoritmus működése azonban nem minden esetben kielégítő. A hibákat okozhatja az, ha a szemcsehatáron több szakadás is megtalálható. Ekkor egy önálló, elkülönült határrész alakulhat ki, mint az a 3.6. ábrán látható.

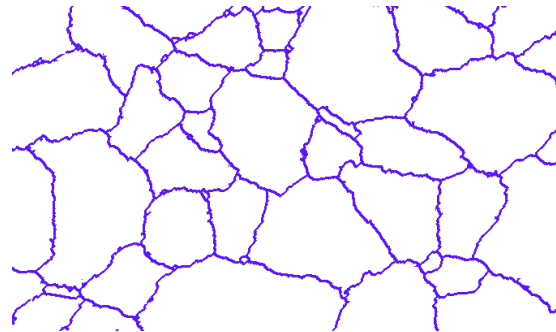
Ennek hatására az invertálásakor lyuk keletkezik a szemcsében, amit az erózió előtt eltávolítunk. Így a szűkület az összeolvadt szemcsék között megszűnik, és az algoritmus nem választja szét azokat.

A hibák másik oka lehet a szemcsehatárokból kilógó vonalszakasz, amely az előfeldolgozás során alakul ki. Ezek a vonalak nem tartoznak közvetlenül a szemcsehatárokhoz, azonban sötét színük miatt az ADTS kiválasztja őket. Bizonyos esetekben ezek egy összetartozó szemcsén belül is okozhatnak szűkületet, mint ahogy a 3.7. ábrán látszik. Ez a már meglévő, jól azonosított szemcsék szétesését eredményezi.

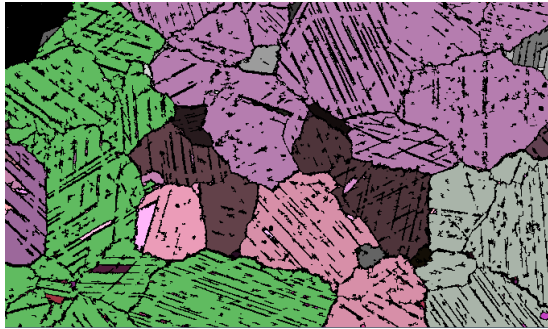
A morfológiai szétválasztás jelentős hátránya, hogy a dilatálás-metszetképzés eredményeképpen az elválasztó szakaszok a kellenél nagyobb képrészt lefednek, és nem követik jól a határrajzolatot (vastagabbak, simábbak). Ez a tökéletlen kijelölés a dilatáció jellegéből adódik, és paraméterbeállításokkal nem javítható. Ez a szemcsék hibátlan kijelölését lehetetlenné teszi, azonban az így keletkezett információvesztés csekély. Az algoritmus tehát összességében jó megoldás az összeolvadás problémájára.



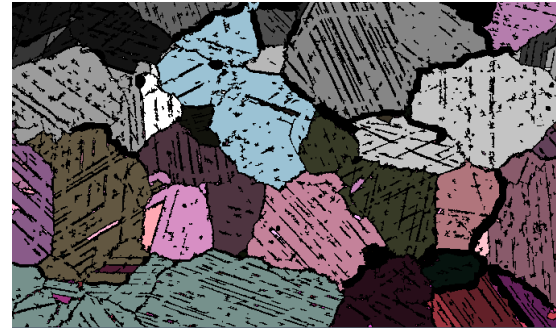
(a) Ideális szemcserajzolat a képre vetítve.



(b) Ideális szemcserajzolat.

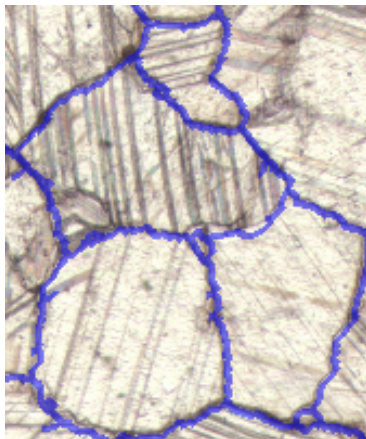


(c) Szemcsék előfeldolgozás után.

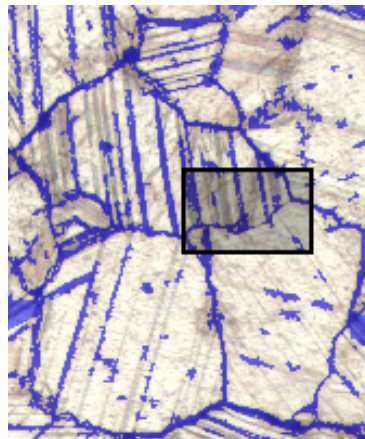


(d) Szemcsék a morfológiai szétválasztás után.

3.5. ábra. A morfológiai szétválasztás eredménye.



(a) Ideális szemcserajzolat a képre vetítve.



(b) Szemcsehatárok a morfológiai szétválasztás után.

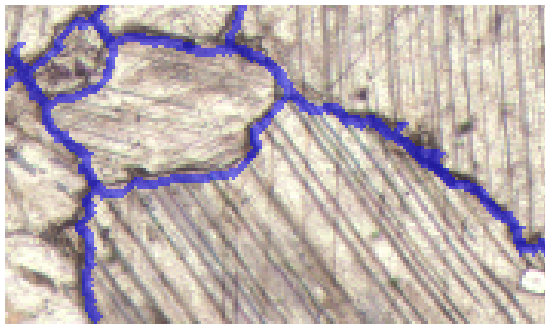


(c) A kialakult hibás szemcsék a szétválasztás után.

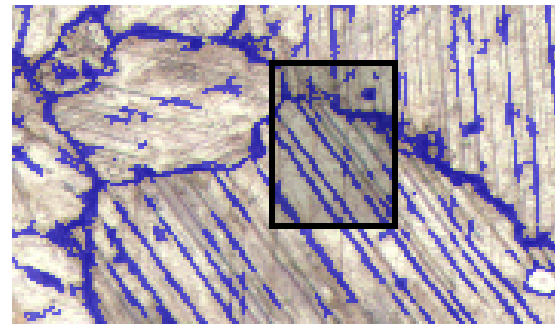


(d) A hibát okozó szakadások közti határdarab.

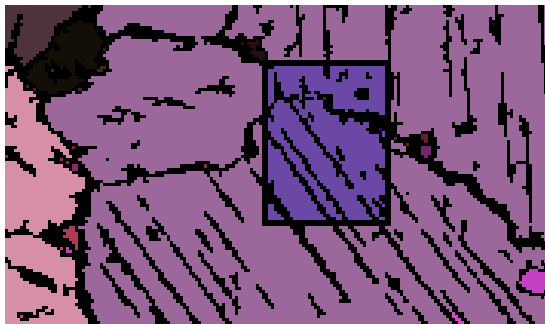
3.6. ábra. Több szakadás okozta hiba kialakulása.



(a) Ideális szemcserajzolat a képre vetítve.



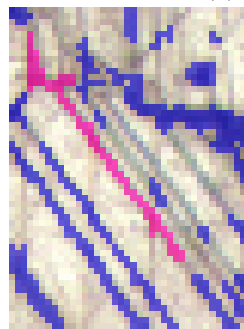
(b) Határok az ADTS futtatása után.



(c) Szemcsék a szétválasztás előtt.



(d) Hibás szemcsék a szétválasztás után.



(e) A hibát okozó belógó határszakasz.

3.7. ábra. A szemcsébe lógó határszakasz okozta hibás szétválás.

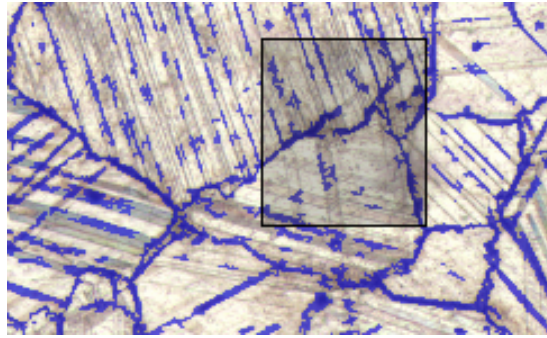
### 3.1.2. Vonalvégződés összekötése ellipszis alapú távolságfüggvénnyel

A szemcseösszeolvadás megoldásának egyik módja a szegmentálás helyett az abból képzett váz (skeleton) vizsgálata. Mivel a skeleton egyszerűbb felépítésű ponthalmaz (mindenütt azonos szélességű), további műveletek elvégzését is lehetővé teszi.

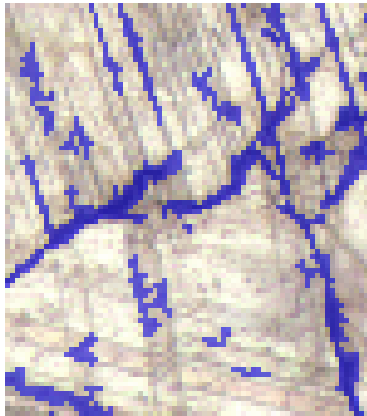
Így a szakadások problémája visszavezethető a váz szakadásainak megszüntetésére, azaz két skeletonvégződés összekötésére, mint a 3.8. ábrán látható. Míg a szegmentálást alkotó régióknak nincsenek végződésai, a skeletonnál ezek egyszerűen meghatározhatók. Az összekötés sarkalatos pontja a vizsgált végződéshez a megfelelő, szemcsehatáron lévő folytatás kiválasztása.

Egyik lehetséges megoldás, ha a végződéseket a hozzájuk legközelebb álló skeletonrészsel kötjük össze. Ez a módszer azonban nem ad jó eredményt azokban az esetekben, mikor a végződéshez legközelebb egy olyan skeletonrész található, mely nem tartozik a folytatni kívánt szemcsehatárhoz, ez pedig sok esetben fennáll. Az általam javasolt módszer ezért kihasználja, hogy a vonalvégzések szemcsehatárhoz tartozó folytatása a vonal irányában a legvalószínűbb.





(a) Szemcsehatárok az ADTS futtatása után a képre vetítve.



(b) Szemcsehatár szakadása az ADTS futtatása után.



(c) Az ADTS skeletonjának szakadása.

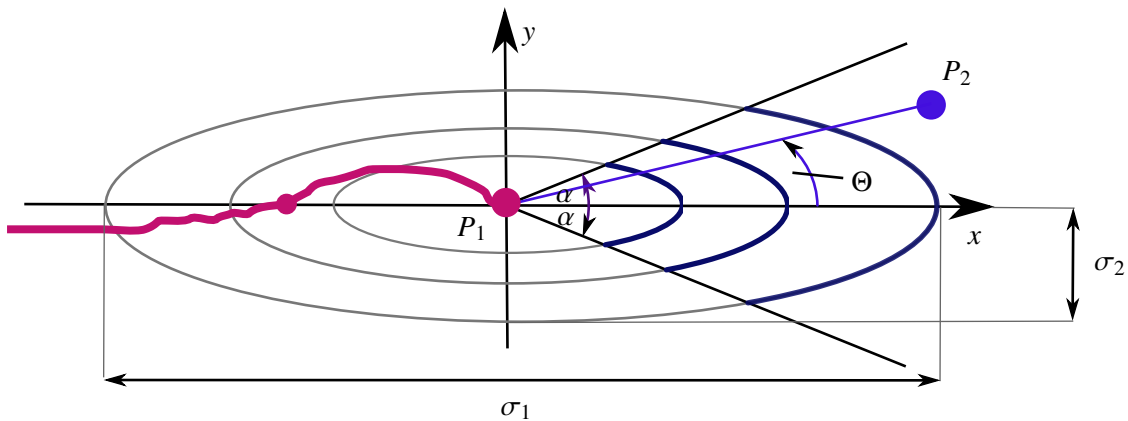


(d) A skeleton szakadásának két végződése.

3.8. ábra. Skeleton szakadások.

**Módszer: speciális távolságdefiníció**

Módszerem olyan keresésből indul ki, amelyben a vizsgált vonalvégződéstől azonos távolságra lévő ponthalmazokon keressük a folytatást, a végződéstől egyre távolodva. A legelőször megtalált, skeletonhoz tartozó pixel tekinthető a vonal folytatásának. Euklideszi távolságfüggvény esetén ez koncentrikus körökön való keresést jelentene, ami azonban nem célravezető, mert nem veszi figyelembe a vonal irányát.



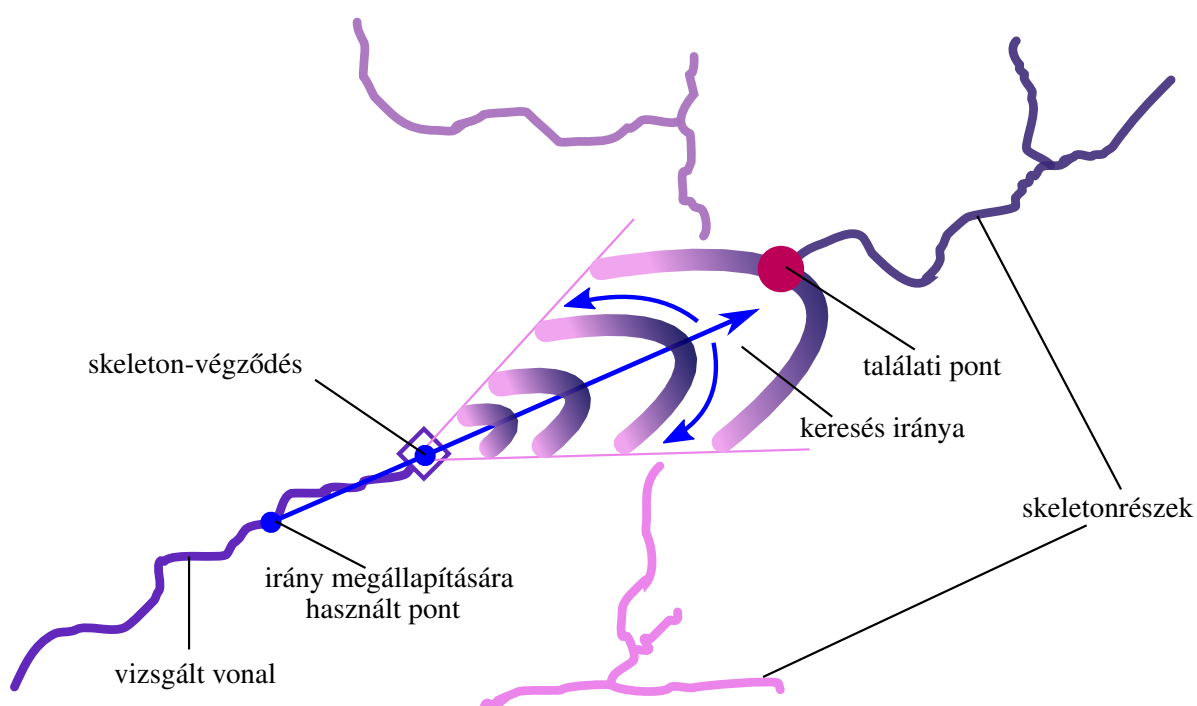
3.9. ábra. Ellipszis alapú távolságfüggvény.

A 3.9. ábrán az általam használt távolságfüggvény látható. A távolság formális definíciója a következő:

$$d(P_1, P_2) = \begin{cases} \sqrt{\frac{(x_1 - x_2)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y_1 - y_2)^2}{\sigma_2^2}}, & \text{ha } |\Theta| < \alpha \\ \infty & \text{egyébként,} \end{cases}$$

ahol  $x_1, y_1$  a  $P_1$  és  $x_2, y_2$  a  $P_2$  pont koordinátái a vonalirány által definiált koordinátarendszerben,  $\sigma_1, \sigma_2$  tetszőleges konstans értékek, melyek aránya rögzített.

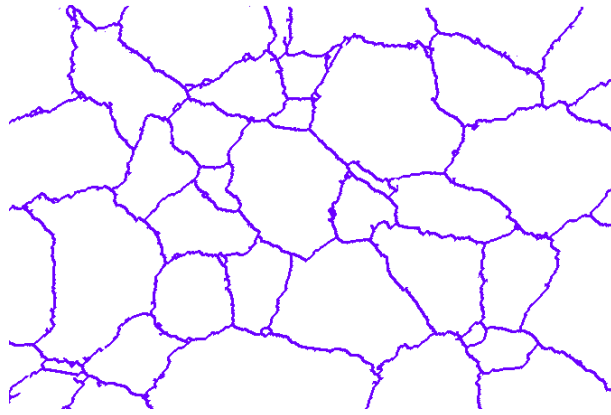
Az így kialakult térben egy kitüntetett ponttól (a vonalvégződéstől) azonos távolságra lévő pontok ellipszisíveket írnak le, mint ahogy a 3.9. ábrán látható. Ezen ellipszisívek mentén keresi az algoritmus a vonal folytatását. Az ellipszisiek alakját a  $\sigma_1$  és  $\sigma_2$  értékek határozzák meg. Cél, hogy a  $\sigma_1$  értéke nagyobb legyen, mert ekkor valósul meg a vonal irányában történő keresés.



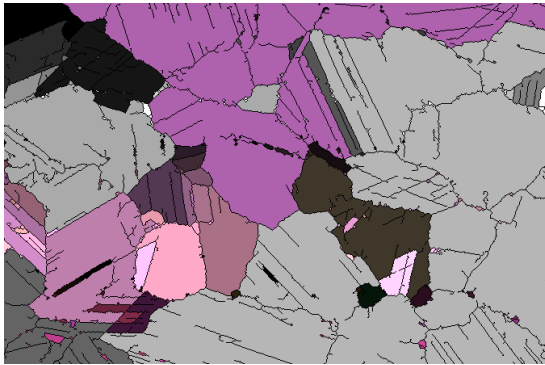
3.10. ábra. Keresési folyamat ellipszis alapú távolságfüggvény segítségével.

Az  $\alpha$  nyílásszögű térrészen kívül eső pontokat egyáltalán nem vizsgáljuk, ezek távolsága végtelen. A vonal irányának meghatározása a végződéspixel mögött a vonalon lévő 5. képpont alapján történik. Az ellipszisívek mentén a távolságdefiníció alapján a pontok eredetileg egyenrangúak a keresés szempontjából, azonban az algoritmus ezeket is rendezi. A legkorábban vizsgált pontok az euklideszi értelemben a vonalvégződéstől legtávolabb esők lesznek. Ezek a vonalirányban lévő pixelek, utánuk pedig az ellipszisív mentén két oldalt következő pontok, ahogy azt a 3.10. ábrán a nyilak iránya mutatja. Ekkor az általunk definiált térben az azonos távolságra lévő pixelek közül az algoritmus először a vonal irányában lévő találja meg.

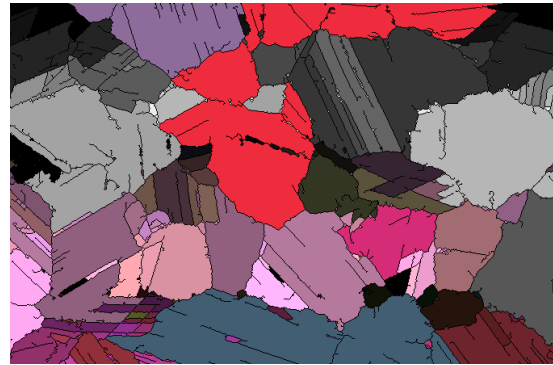
A keresést meghatározott, kicsiny távolságon belül futtatjuk, ami jó szűrő módszer azon végződések hibás összekötéséhez, amelyek nem egy szemcsehatár szakadásai miatt jöttek létre.



(a) Ideális szemcserajzolat.



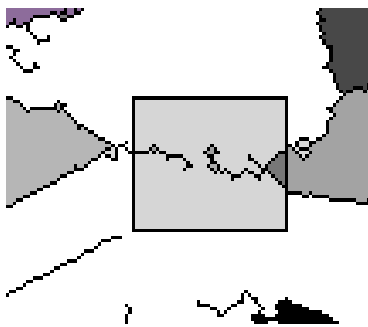
(b) Szemcsék a szétválasztás előtt.



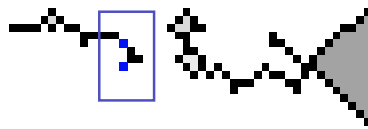
(c) Szemcsék a szétválasztás után.

3.11. ábra. Az ellipszis alapú végződésösszekötés hatása a szemcserajzolatra.

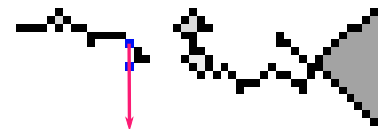
### Az algoritmus értékelése



(a) Skeleton szakadása a szemcsehatáron.



(b) A helytelen keresési irányt meghatározó pixelek a kijelölt részen.

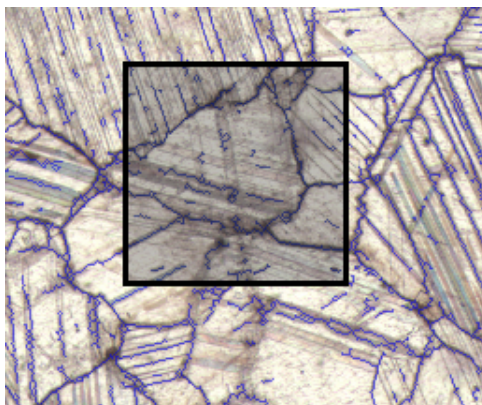


(c) Két pixel alapján meghatározott helytelen keresési irány a kijelölt részen.

3.12. ábra. A vonalirány-meghatározás egyik lehetséges hibája.

Az algoritmus működése a legtöbb szakadás esetén kielégítő. A 3.11. ábrán látható, hogy futtatása után hogyan közelít a szemcserajzolat az ideálishoz. Az is megfigyelhető, hogy sok szemcsét a módszer a belógó határvonalak miatt kettévágott. Ez a hiba ugyanennél az oknál fogva már a morfológiai szétválasztásnál is előfordult. Az így szétválasztott szemcsék összeolvasztására a következő fejezetekben ismertetek több megoldást.

A módszer sok végződés esetében generálhat hibás összekötést. Ennek egyik oka, hogy a skeleton végződéseit közül sok nem a szemcsehatár megszakadása miatt jön létre. E hibák többsége szűrhető a maximális keresési távolság jó beállításával, hiszen a határon lévő rések általában szűkek, ezért a folytatás viszonylag közel megtalálható. A túl nagy maximális távolság sok helytelen összekötést eredményez, ahogy a 3.13. ábrán látható.



(a) Az ADTS eredményéből képzett skeleton az eredeti képre vetítve.



(b) A fent kijelölt skeletonrészlet.



(c) Túl nagy maximális távolság okozta skeletonszakaszok.

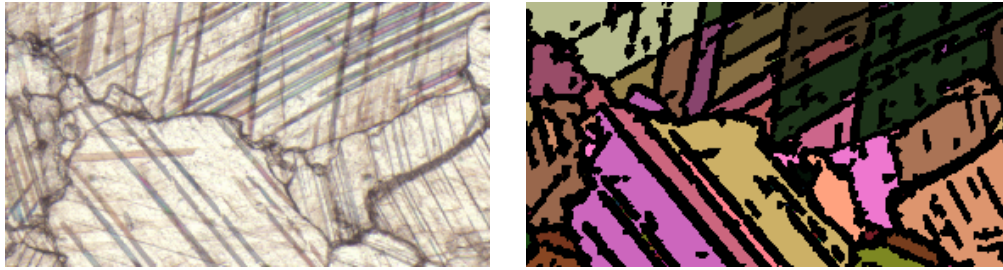
3.13. ábra. A végződésösszekötés okozta hiba nagy maximális távolság mellett.

A hibák másik oka a vonalirány rossz meghatározása. Ekkor az algoritmus nem megfelelő irányban keresi a vonal folytatását, amit vagy nem talál vagy hibás szakasszal köti össze a végződést. A 3.12. ábrán erre látható példa. Ennek kiküszöbölésére jó megoldás lehet az iránybecslés pontosítása, például egyenesillesztés segítségével.

## 3.2. Szemcsék szétesésének szűrése

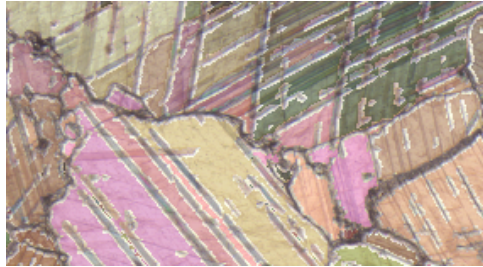
Az előfeldolgozás során létrejött szemcsék között számos olyan csoportot is találunk, amelyek együtt egy nagyobb szemcsét alkotnak, az algoritmus azonban külön szemcsékként ismeri fel őket. Ez a jelenség a 3.14. ábrán jól megfigyelhető, ahol a szétesett részeket eltérő színek jelzik.

Ezek az osztályozás pontatlanságát okozhatják az összeolvadáshoz hasonlóan, hiszen nem valós adatokat generálnak (több kisebb egység). Ebben a szakaszban e probléma kialakulásának okával illetve megoldásával foglalkozom.



(a) Eredeti kép.

(b) ADTS által talált szemcsék.

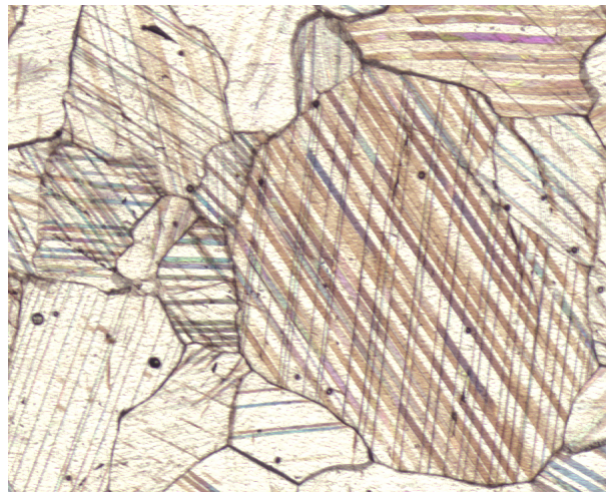


(c) ADTS által talált szemcsék a képre vetítve.

3.14. ábra. Hibás szemcseszétesés az ADTS futtatása után.

### 3.2.1. Ikerkristályosodás

A szemcsék szétesésének fő okai a márványképeken látható egyenes vonalak, amelyek az ún. *ikerkristályokra* vezethetők vissza. Az ikerkristályosodás oka, hogy az ásvány két azonos típusú kristálya egy sík (az ún. *ikersík*) mentén összenő. Az ikersíkoknak a vékonycsiszolat felszínével való metszete adja ezeket a jellegzetes egyenes, párhuzamos vonalcsoportokat.



3.15. ábra. Jellegzetes ikerkristályvonalak a vékonycsiszolati képen.

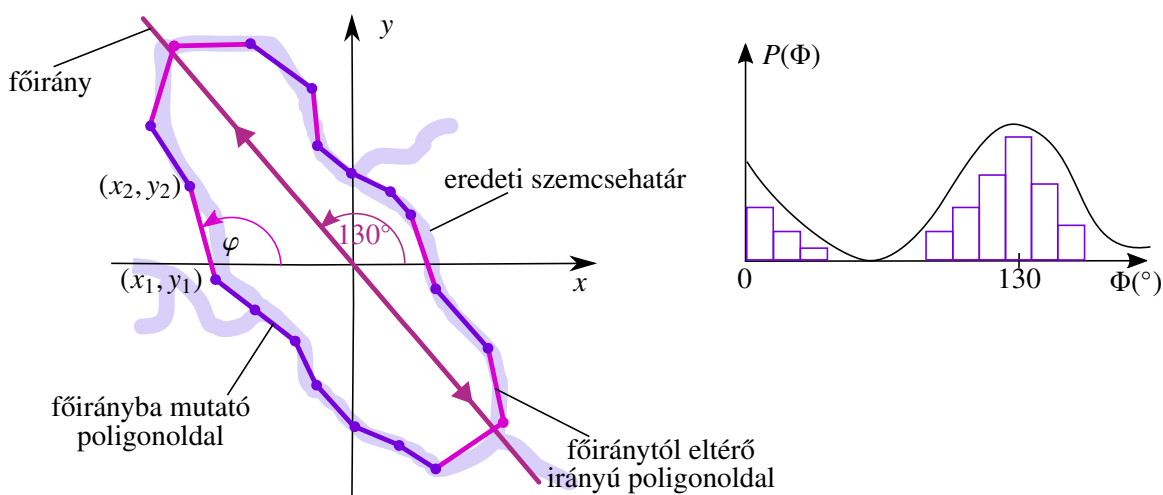
Ezek a vonalcsoportok könnyen megtéveszthetik a képfeldolgozó algoritmusokat, hiszen színükben hasonlítanak a szemcsék széleire, mint az a 3.15. ábrán is látszik. Emiatt az kontúrkeresés során a program helytelenül szemcsehatárként azonosíthatja őket. A szemcsekontúrok és az ikervonalak elkülönítésére ezért olyan algoritmusokat dolgoztam ki, amelyek figyelembe veszik az ikerkristályvonalak szemcsehatároktól eltérő jellemzőit – például azok egyenességét –, amit az ismert szegmentáló módszerek nem használnak ki.

Jelen dolgozatban a szemcsék elkülönítésével foglalkozom, amihez az ikerkristály vonalak kiszűrése szükséges. A szűrés során azonosított ikerkristályok sajátosságait azonban érdemes tárolni, hiszen ezek (például a vonalak iránya, sűrűsége) jellemzőek az adott márványra, így hozzájárulnak az osztályozás sikerességéhez.

### 3.2.2. Ikerkristályok azonosítása alak alapján

Az ikerkristályok egyik feltűnő tulajdonsága a hosszúkás téglalapalak. Ez alapján szűrve a szemcséket viszonylag könnyen kiválaszthatóak az ikerkristályok. Az alak detektálásának egyik módja a szemcse körvonalának vizsgálata. Amennyiben egy főirány mentén az oldalak hosszan párhuzamosak, feltételezhető, hogy a szemcse téglalap alakú, azaz ikerkristály. Az így talált oldalakat átmetszve az ikerkristályok összeolvadnak az eredeti szemcsével.

#### Szemcsehatár főirány-meghatározása hisztogram alapján



3.16. ábra. Szemcseoldalak irányhisztogramjának meghatározása poligonok segítségével.

A hisztogramos főirány-meghatározás vázlatos működése a 3.16. ábrán látható. A módszert megvalósító algoritmus első lépésben poligonnal közelíti a szemcsehatárokat. A következő lépésben az így kapott poligonoldalak irányait határozza meg. Az oldalak hajlásszöge:

$$\varphi = \text{atan2}((y_2 - y_1), (x_2 - x_1)),$$

$$0^\circ \leq \varphi < 360^\circ,$$

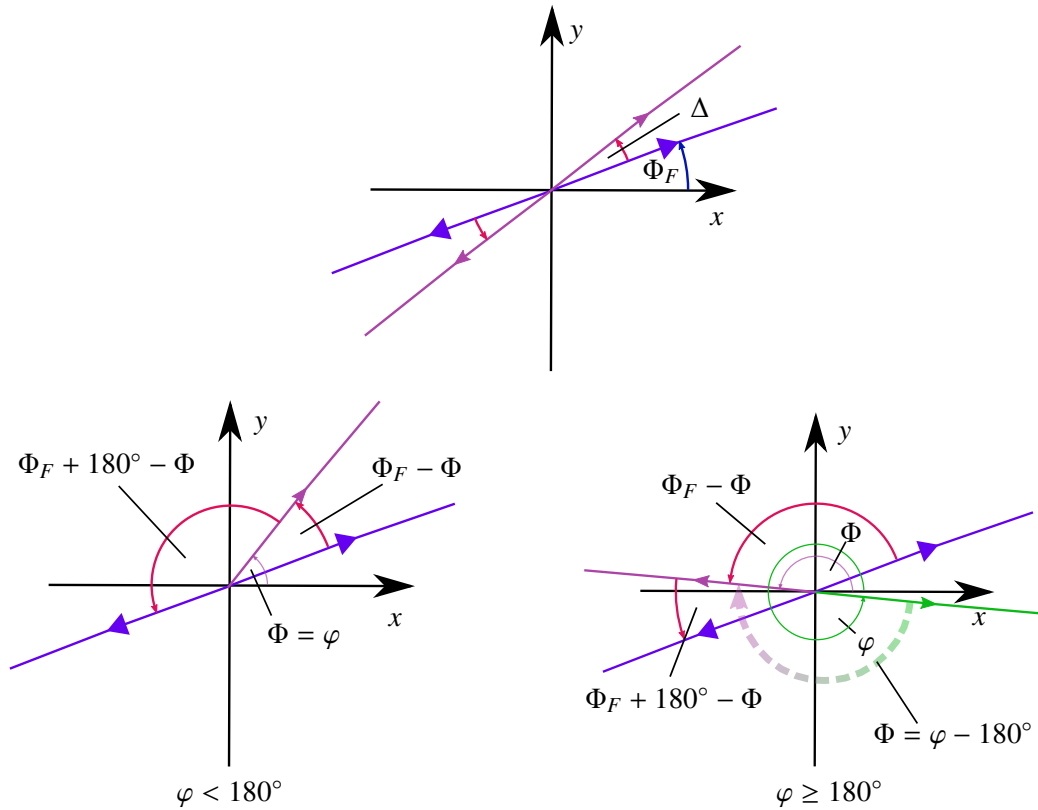
ahol  $x_1, y_1, x_2, y_2$  a poligonoldal két végpontjának koordinátái,  $\varphi$  pedig a hajlásszög. Az atan2 függvény a tangens függvényre támaszkodva, az argumentumok előjele alapján a megfelelő síknegyedbeli – azaz a  $0^\circ$  és  $360^\circ$  közötti intervallumba eső – szöveget szolgáltatja [1].

Ebből az oldalirányok a következőképpen definiálhatók:

$$\Phi = \begin{cases} \varphi, & \text{ha } \varphi < 180^\circ \\ \varphi - 180^\circ, & \text{ha } \varphi \geq 180^\circ, \end{cases}$$

ahol  $\Phi$  az oldalirány. Az így kapott értékekből egy oldalhosszal súlyozott irányhisztogram készíthető. A főirány a hisztogram legnagyobb gyakoriságú osztályának középértéke. A következő lépésben az

algoritmus a poligonoldalak főiránnyal való párhuzamosságát vizsgálja. A párhuzamosság mértékének meghatározása a 3.17. ábrán látható.



3.17. ábra. Oldal párhuzamosságának meghatározása a főirányhoz képest. Az ábrán kék nyíl jelzi a főirányt. Ehhez viszonyítjuk az aktuálisan vizsgált oldal irányát (lila nyíl). A jobb alsó ábrán az oldal irányának számítása látható  $180^\circ$ -nál nagyobb hajlásszögekre (zöld nyíl).

Ehhez szükséges két oldal párhuzamosságának mértékét definiálni:

$$\Delta(\Phi_1, \Phi_2) = \min\{|\Phi_1 - \Phi_2|, |\Phi_1 - 180^\circ - \Phi_2|\},$$

ahol  $\Delta$  a párhuzamosság mértéke,  $\Phi_1, \Phi_2$  pedig a két oldal fent definiált iránya. A  $\Delta$  függvény értékei  $0^\circ$  és  $90^\circ$  közé esnek; a tökéletes párhuzamossághoz a 0 érték tartozik. A párhuzamosságfüggvény felfogható két egyenes egymáshoz képest vett nyílásszögeként, ahol az egyenesek akkor a legkevésbé párhuzamosak, ha az egymással bezárt szögük  $90^\circ$ .

A szemcse ikerkristálynak tekinthető, amennyiben igaz, hogy:

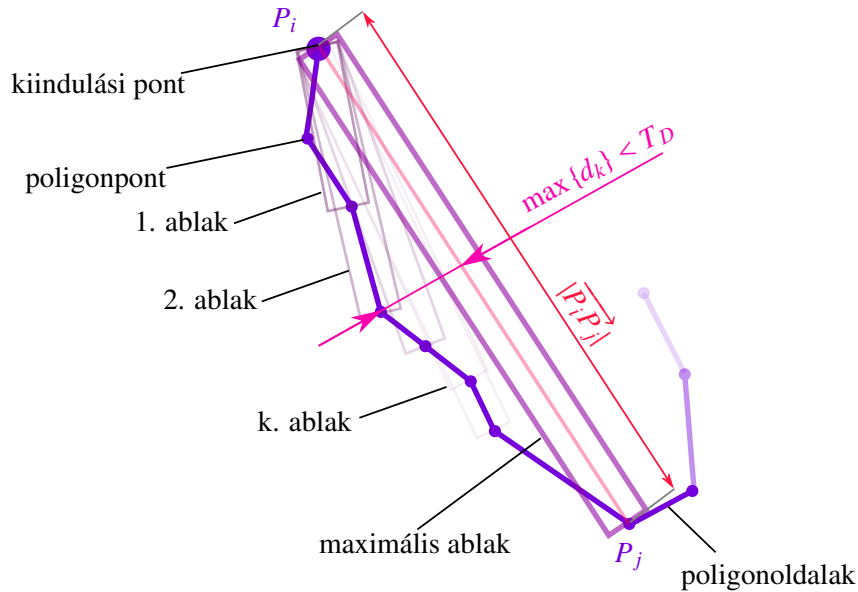
$$\sum_i l_i > T_L \cdot L, \quad \forall i : \Delta(\Phi_F, \Phi_i) < T_A,$$

ahol  $l_i$  az  $i$ -edik poligonoldal hossza,  $T_L$  a hosszúsághoz tartozó relatív küszöbérték ( $0 \leq T_L \leq 1$ ),  $L$  a poligon kerülete,  $\Phi_F$  a főirány,  $\Phi_i$  az  $i$ -edik poligonoldal iránya,  $T_A$  pedig az irányokhoz tartozó küszöbérték ( $0^\circ \leq T_A \leq 90^\circ$ ). Tehát az algoritmus azokat a szemcséket választja ki, amelyek oldalai hosszban párhuzamosak a főiránnyal, azaz elnyújtott téglalap alakúak.

### Leghosszabb egyenes oldal átvágása

Az ikerkristályok azonosítása után a cél ezek beolvasztása nagyobb szemcsékbe. Ennek egy módja lehet a kristályok határainak átvágása, mert ekkor egy *connected component analysis* futtatásával a vágásokon

keresztül az ikerkristályok egymásba vagy nagyobb szemcsékbe folynak. A módszerhez szükséges az ikerkristályok leghosszabb oldalának megkeresése.



3.18. ábra. Ablakozás egyetlen pontra. Az ábrán a felső,  $P_i$  pontból indított keresés eredménye látható, az a szakasz, melynek távolsága a legtávolabbi poligonponttól még kisebb a küszöbértéknél ( $T_D$ ).

Az azonosításhoz használt módszer vázlatosan a 3.18. ábrán látható. A szemcsét reprezentáló poligon minden pontjából ablakozó keresést indítva meghatározható a leghosszabb, még jól illeszkedő ablak, amit a továbbiakban a leghosszabb oldalnak tekinthetünk. Az ablak nem más, mint a kiindulópontból a poligon különböző pontjaiba mutató szakasz. Az éppen vizsgált ablak két végpontja közti csúcsok szakasztól vett távolságait sorra megvizsgáljuk. Ha bármely távolság túllépi a megadott küszöbértéket, az adott pontból indított keresés megáll. Az így kapott maximális ablakok mindegyikét tárolva kinyerhető azok közül a legnagyobb hosszúságú. Ez tekinthető a poligon leghosszabb oldalának. A leghosszabb oldal tehát formálisan a következőképpen fogalmazható meg:

$$\vec{a} = \overrightarrow{P_i P_j}$$

ahol  $\overrightarrow{P_i P_j}$  irányított szakasz hossza a legnagyobb olyan távolság, amelyre teljesül, hogy:

$$\forall i \leq k \leq j: d(P_k, \overrightarrow{P_i P_j}) < T_D,$$

$$1 \leq i < j \leq N,$$

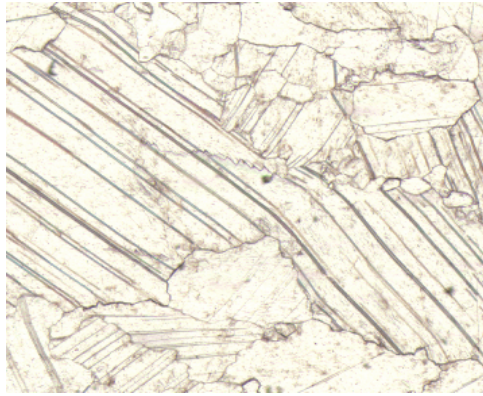
ahol  $\vec{a}$  a leghosszabb oldalhoz tartozó szakasz,  $P_i, P_j$  a szakasz két végpontja,  $T_D$  a távolságküszöb,  $d(P_k, \overrightarrow{P_i P_j})$  a k-adik csúcspontnak az ablakot reprezentáló szakasztól vett távolsága,  $N$  pedig a poligon csúcsainak száma. Az így kapott szakaszt az algoritmus közepén átmetszi.

### Az algoritmus értékelése

A módszer sok esetben jó eredményeket ad, helyesen találja meg a keresett ikerkristályokat, mint az a 3.19. ábrán látható.

Az algoritmus leggyengébb pontja azonban a szemcsehatárok átmetszése, ugyanis az a közelítő poligonon elhelyezett ablak közepét vágja át, nem az eredeti szemcsehatárt. A vágóelemet ezért érdemes lehet a maximális ablakszakasz közepe helyett, a szemcsehatáron vetítéssel elhelyezni.

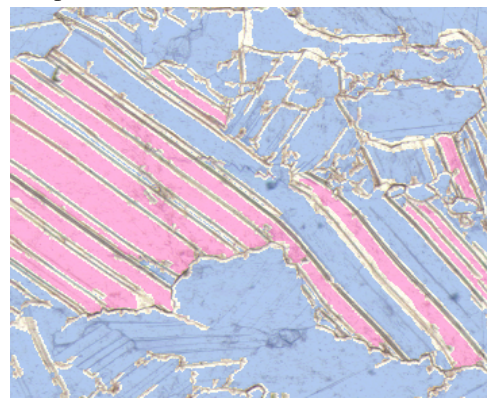




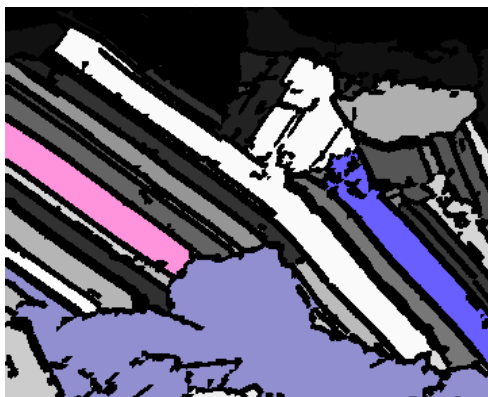
(a) Eredeti kép.



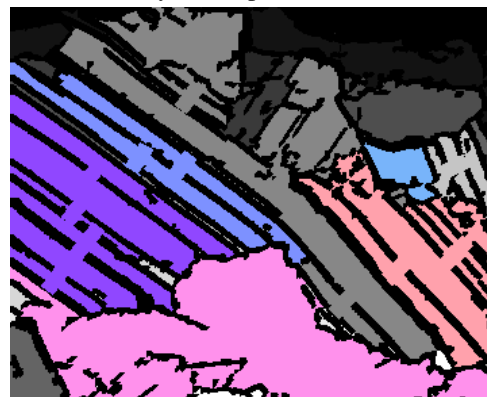
(b) Ideális szemcserajzolat.



(c) Az alak alapú azonosítás segítségével talált ikerkristályok a képre vetítve.



(d) Az algoritmus futtatása előtti szemcserajzolat.



(e) Az algoritmus futtatása utáni szemcserajzolat.

3.19. ábra. Ikerkristályok alak alapú azonosítása, összeolvasztása.

Az algoritmus futtatása előtt érdemes valamely szemcsezétválasztó módszert alkalmazni, mint ahogy a 3.19c. ábrán is megfigyelhetők a morfológiai szétválasztás nyomai. Ekkor ugyanis az algoritmus a szomszédos szemcsékbe helytelenül beolvadt, alakjukat így visszanyert ikerkristályokat is megtalálja.

### 3.2.3. Ikerkristály-vonalak azonosítása gráfalgoritmussal

Az ikerkristályok beolvasztása után az átmetszés hatására összefüggő szemcsék alakulnak ki, ezekben azonban még jól láthatóak a korábbi ikerkristályhatárok mint belógó, egyenes vonalak. Ezek azonosítása

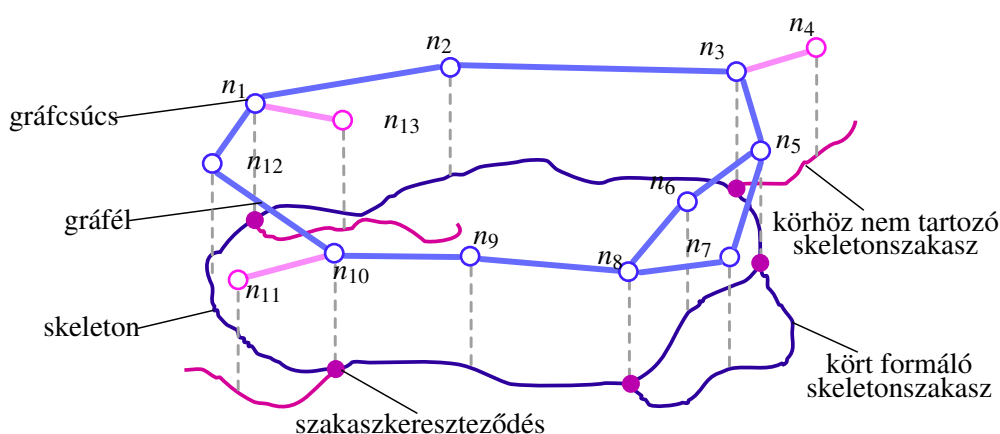
és elhagyása a rajzolat további javulását eredményezheti. Ebben a szakaszban az ikerkristályvonalak eltávolításának módját ismertetem.

## Alapgondolat

Az eldobás alapja az, hogy az ikerkristályok egy ideális szemcsehatártól eltérően nem alkotnak hurkokat. Gráfokban könnyen kereshetőek hurkok, ezért érdemes a szegmentálást gráfként reprezentálni, és azon körkereső algoritmust futtatni. Erre a skeleton a legalkalmasabb, mert ennek ágai és kereszteződései jól kezelhetők gráfok formájában.

## Skeleton gráfrepresentációja

A 3.20. ábrán látható, hogy a skeleton szakaszai a gráf mely részeinek felelnek meg.



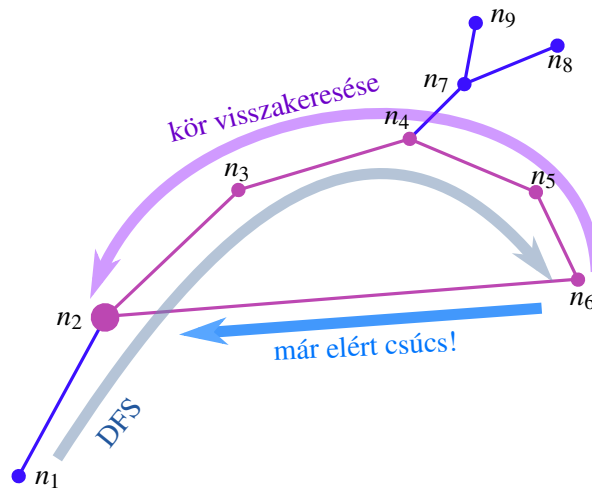
3.20. ábra. A skeleton gráfrepresentációja.

A skeleton ágakból és az ágak közötti kereszteződésekből áll. Minden egyes ág és kereszteződés egy gráfcsomóponttal reprezentálható. Amennyiben egy ág egy kereszteződéshez kapcsolódik, a gráfban a megfelelő csomópontok között él fut. Az így elkészített gráfban lévő körök a skeletonban szintén hurkokat alkotnak, ez teszi lehetővé az algoritmus futtatását.

## Körkeresés

A javasolt algoritmus a körkeresést mélységi bejárás (röviden: DFS) segítségével valósítja meg, ahogy a 3.21. ábrán látható [5].

A módszer lényege, hogy a bejárás során elért minden csomóponttól tároljuk, hogy járt-e már ott az algoritmus. Ha a bejárásban soron következő csúcs státusza bejárt, akkor az algoritmus kört talált. A csúcsössöket tároló tömb segítségével pedig a kör visszakövethető. A visszakövetés során minden egyes pontjáról tároljuk, hogy körhöz tartozik, ez alapján a megfelelő skeletonrészek kiválaszthatók. Minden olyan skeletonrész, ami nem tagja körnek, később eltávolítható a szegmentálásból, mint az a 3.22d. ábrán látható.



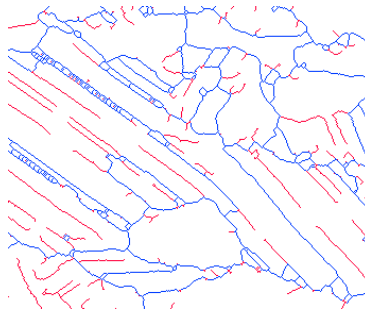
3.21. ábra. A körkeresés folyamata a skeletban.



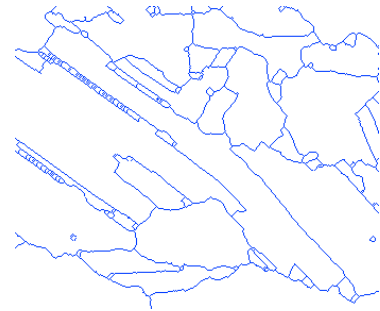
(a) Eredeti kép.



(b) Ideális szemcserajzolat.



(c) Gráfalgoritmussal talált körök a skeletban.



(d) Kilógó szakaszok eltávolítása utáni skeletonrajzolat.

3.22. ábra. Gráfalgoritmussal kiválasztott ikerkristályvonalak. A talált köröket kék, a körhöz nem tartozó skeletonrészeket piros szín jelzi.

### Az algoritmus értékelése

Az algoritmus nem megfelelő működése esetén teljes szemcsehatárszakaszok tűnhetnek el, ami nehezen korrigálható hiba. Ezért megfelelő működéséhez először feltétlenül szükséges a szemcsehatárok szakadásainak megszüntetése (ami miatt zárt körök lesznek) és az ikerkristályvonalak átvágása. Ellenkező esetben a szemcserajzolat jelentősen romlik. Megfelelő előfeldolgozást követően azonban az algoritmus eredményei jók, mint a 3.22. ábrán látható.

## 4. fejezet

# Összefoglalás

Dolgozatomban ismertettem a márvány-vékonycsiszolatok feldolgozására, a szemcsék kinyerésére alkalmas módszereket, részleteztem az ezzel kapcsolatos nehézségeket, és ezek megoldásának lehetőségeit. Bemutattam, hogy mely ismert kontúrkereső–szegmentáló algoritmusok alkalmasak legjobban a szemcsék kinyerésére, illetve hogy milyen új, a márványképekre specializált módszerekkel javítható a feldolgozás eredménye.

### 4.1. Eredmények, értékelés

A képek előfeldolgozására a fent ismertetett *adaptive double threshold segmentert* javasolom. Működése ugyan kielégítő, de az eredmény további pontosítást igényel. Az így nyert szemcsék kétféleképpen javíthatók: a hibásan összeolvadt csoportok szétbontásával, illetve a különvált, de összetartozó régiók összevonásával.

Az összeolvadt szemcsék szétválasztására kétféle módszert ismertettem és teszteltem: a morfológiai algoritmusokon alapuló szétválasztást és a skeletonvégződés ellipszis alapú összekötését. Mindkét algoritmus javítja a szemcserajzolatot, azonban okozhatják összetartozó régiók hibás különválását is. A különválás oka általában az ikerkristályvonalak jelenléte. A feldolgozás következő lépésében érdemes tehát ezeket szűrni, illetve a különvált szemcséket összeolvasztani. E probléma megoldására javasoltam egy módszert, amely alakjuk alapján azonosítja és a környező szemcsékbe olvasztja az ikerkristályokat. Továbbá ismertettem egy gráfalgoritmusokon alapuló megoldást, amely megtalálja a megmaradt ikerkristály-vonalakat, majd eltávolítja azokat.

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy bár a szemcserajzolat javul, és közelít a szabad szemmel elkülöníthető szemcsékhez, még tovább pontosítható.

### 4.2. Kitekintés

Mivel a szemcsék azonosítása javítható, ebben a szakaszban az erre vonatkozó javaslataimat ismertetem, bemutatom továbbá az osztályozást pontosító megoldásokat, és röviden összefoglalom az elkészült program széleskörű felhasználási lehetőségeit is.

A fent leírt algoritmusok működésének pontosítására a következőket javasolom:

- Az alak alapján azonosított ikerkristályok esetén a két leghosszabb oldal megkeresésével és átvágásával két környező szemcsébe egyszerre olvashatjuk be a talált kristályt, ami további javulást eredményez.
- Az ikerkristályok átmetszési helyének pontosításával is javulás érhető el, ahogy azt fentebb részleteztem.
- Az ellipszis alapú végződésösszekötés vonaliránybecslése pontosítható, ha az irányt nem csupán két pixel szolgáltatja, hanem a vonalvégre illesztett egyenes.
- A morfológiai szűkületkeresés használható szakadások helyének azonosítására is. Az így kapott képrészek után összeköthetjük a skeleton végződéseit. Így megszabadulhatunk a morfológiai algoritmusokkal feleslegesen kinyert, határhoz nem tartozó képpontoktól, és a végződésösszekötés helyét is előzetes szűrésnek vetjük alá.

Az osztályozást segítő további javaslataim:

- A skeletonból kinyert kereszteződésszám is segítheti a márványok azonosítását.
- Az ikerkristályvonalak irányának és sűrűségének meghatározása további információt szolgáltat a márvány jellegéről.

A márványképek feldolgozása messzire mutató kutatási téma. Az elkészült program más felhasználási lehetőségei közül néhány:

- Homokkő szemcséinek vizsgálata. A homokkőszemcsék szomszédossági számából a kő minőségére következtethetünk, ami erősen meghatározza annak felhasználási módját például restaurációs alkalmazások esetén.
- Háromdimenziós márványképek (három, egymásra merőleges síkban lévő, összeillesztett vékonycsiszolat) vizsgálatával az ikerkristályok térbeli irányai is kinyerhetők. Ezt és az ikerkristályok torzulásának (elhajlásának - lásd 3.22a. ábra) irányát felhasználva következtethetünk a márványt szemcséképződés közben ért terhelésre. Ennek meghatározása további geomorfológiai alkalmazásokat tesz lehetővé.
- Anyagtechnológiai elemzésekhez – például acélötvözetek vizsgálata – is jól használható a program.

# Köszönetnyilvánítás

Köszönöm konzulensemnek, Dr. Csorba Kristófnak, hogy megismertette velem a képfeldolgozást, ezzel irányt adva tudományos tevékenységemnek, valamint értékes szakmai és emberi támogatását.

Köszönöm továbbá Dr. Zöldföldi Juditnak és Dr. Székely Balázsnak a dolgozatomhoz fűzött hasznos megjegyzéseiket, a kutatással kapcsolatos iránymutatást, illetve azt, hogy rendelkezésemre bocsátották a vékonycsiszolati képeket.

# Irodalomjegyzék

- [1] W Burger and M J Burge. *Principles of Digital Image Processing: Fundamental Techniques*. Springer, 2009.
- [2] OpenCV developer team. OpenCV 2.4.9.0 online documentation, 2014. Elérhető: <http://docs.opencv.org> [letöltve: 2014.10.21.].
- [3] M B Dillencourt, H Samet, and M Tamminen. A general approach to connected-component labeling for arbitrary image representations. *Journal of the ACM*, 39(2):253–280, april 1992.
- [4] W A Green, S M M Young, N Van Der Merwe, and J J J Herrmann. Source tracing marble: trace element analysis with inductively coupled plasma-mass spectrometry. In *Interdisciplinary Studies on Ancient Stone*, 2002.
- [5] Gyula Y. Katona, András Recski, and Csaba Szabó. *A számítástudomány alapjai*. TYPOTEX, 2006.
- [6] G Molli and R Heilbronner. Microstructures associated with static and dynamic recrystallization of carrara marble. *Geologie en Mijnbouw*, 1999.
- [7] N Oesterling, R Heilbronner, H Stünitz, A Barnhoorn, and G Molli. Strain dependent variation of microstructure and texture in naturally deformed carrara marble. *Journal of Structural Geology*, 2007.
- [8] Kálman Palágyi. *Képfeldolgozás haladóknak*. TYPOTEX, 2011.
- [9] M Pentia, N Herz, and B Turi. Provenance determination of classical marbles: a statistical test based on 87sr/86sr, 18o/16o and 13c/12c isotopic ratios. In *Interdisciplinary studies on ancient stone*, 2002.
- [10] J C Russ. *The Image Processing Handbook, Sixth Edition*. CRC Press, 2011.
- [11] Balázs Székely and Judit Zöldföldi. Fractal analysis (fa) and quantitative fabric analysis (qfa) data base of west anatolian white marbles. In *ASMOSIA VII. Proceedings of the 7th International Conference of Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity*, 2010.
- [12] Judit Zöldföldi. *Petroarchaeological Study on the Provenance of White Marbles in West Anatolia*. PhD thesis, Eberhard Karls Universität Tübingen, 2011.
- [13] Judit Zöldföldi, Peter Hegedűs, and Balázs Székely. Missmarble: egy archeometriai, művészettörténeti és műemlékvédelmi célú, internet-alapú, interdiszciplinális adatbázis. *Archeometriai Műhely*, 2008.