

A Robust to Leakage Method for Airway Tree Segmentation Based on Shape Feature Optimization

F. Yousefi Rizi¹, A. Ahmadian^{2*}, J. Alirezaie³, E. Fatemizadeh⁴, N. Rezaie⁵

¹ M.Sc Graduated, Biomedical Systems & Biophysics Department, Biomedical Systems & Biophysics Department, Research Center for Science and Technology in Medicine (MI Group), Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran, fyousefi@razi.tums.ac.ir

² Associate Professor, Biomedical Systems & Biophysics Department, Research Center for Science and Technology in Medicine (MI Group), Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

³ Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Engineering and Applied Science School, Ryerson University, Canada, javad@ee.ryerson.ca

⁴ Assistant Professor, Department of Medical Engineering, Electrical Engineering School, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, fatemizadeh@sharif.edu

⁵ Assistant Professor, Pneumologist Consultant, Medical School, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran, drnaderrezaie@yahoo.com

Abstract

Partial volume effect and image noise greatly decrease the visibility of the airway wall. Another dilemma with airway segmentation methods, which significantly influences their accuracy, is the leakage into the extra-luminal regions due to thinness of the airway wall during the process of segmentation. A solution to this problem in the previous methods was based on leak detection and reduction by adjusting the segmentation parameters and performing the whole segmentation process, which is very time consuming and demands user interaction. The new strategy presented here is to prevent the leakage by taking the advantage of the fact that the airway branches are cylindrically shaped objects. This has been achieved by introducing a new mathematical shape optimization approach embedded in FC-FCM algorithm to retain the cylindrical properties of the airway branches during the segmentation process. The main role of this optimization approach is to detect and correct the underlying voxels which belonging to the airway by satisfying both conditions of the fuzzy connectivity and shape features.

The proposed FC-FCM algorithm was first applied on four data sets each containing 430 CT images of CT images of airway tree. The result showed an accuracy of 93% obtained for segmentation of the airway tree up to the fourth generation. We then applied OPT-FC-FCM algorithm to segment the airway tree with optimization process up to the sixth generation of airway. The result proves the ability of our proposed method to complete a visually acceptable segmentation of airway trees with no leakage. The number of detected branches was found 65 (4 times of those obtained by using just the FC-FCM method).

Keywords: Airway segmentation, Fuzzy connectivity, Shape optimization, Center estimation

*Corresponding author

Address: Alireza Ahmadian, Biomedical Systems & Biophysics Department, Medicine School, University of Tehran, Keshavarz Blvd., Poursina Ave, Tehran, Iran.

Tel: +98 21 66466383

Fax: +98 21 66438630

E-mail: ahmadiana@sina.tums.ac.ir

ارائه یک روش مقاوم در برابر نشتی به منظور بخش‌بندی درخت راه‌های هوایی مبتنی بر بهینه‌سازی ویژگی‌های شکل

فرشته یوسفی ریزی^۱، علیرضا احمدیان^{۲*}، جواد علیرضایی^۳، عمادالدین فاطمی‌زاده^۴، نادر رضایی^۵

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی و فیزیک پزشکی، مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی،

دانشگاه علوم پزشکی تهران fyousefi@razi.tums.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی و فیزیک پزشکی، مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران

^۳ دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه رایسون، کانادا javad@ee.ryerson.ca

^۴ استادیار گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف fatemizadeh@sharif.edu

^۵ استادیار گروه داخلی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران drnaderrezaie@yahoo.com

چکیده

پیچیدگی ساختار درخت راه هوایی، اثر جزئی حجم بر شاخه‌های ریز و کتراست پایین بین بافت‌های موجود در قفسه سینه، بخش‌بندی آن را دشوار می‌سازد. پدیده نشتی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در مسیر بخش‌بندی تصاویر پزشکی به ویژه در موارد پیچیده‌ای مانند راه‌های هوایی است. روش اتصال فازی با بهره‌گیری همزمان از دو خاصیت اصلی تصاویر یعنی وجود همگونی در وکسل‌های متعلق به یک شیء و وجود یک ارتباط درهم‌آمیخته بین آنها، و با در نظر گرفتن خاصیت فازی ذاتی تصاویر پزشکی، الگوریتم کارآمدی برای بخش‌بندی ساختارهای پیچیده مانند راه‌های هوایی است. در رویکرد جدید اتصال فازی مبتنی بر خوشه‌یابی فازی FCM، که تحت عنوان FC-FCM به وسیله همین گروه مطرح شده است، ضمن عدم نیاز به تعیین متغیرهای اولیه، فضای جستجو نیز با بهره‌گیری از تابع عضویت فضایی فازی در فرایند برگشتی رشد هسته اولیه محدود شده است. اما در تعیین شاخه‌های پس از لایه سوم با نشتی مواجه می‌شود. امکان تشخیص نشتی فقط پس از رشد آن و فرایند زمان‌بر تکرار بخش‌بندی با متغیرهای جدید که روش متداول در رویارویی با پدیده نشتی است، ما را به سمت ارائه یک فرایند بهینه‌سازی مبتنی بر شکل در بطن الگوریتم اتصال فازی، برای جلوگیری از تشکیل نشتی به عنوان یک شیوه جدید رهنمون شده است. با در نظر گرفتن ساختار استوانه‌ای شاخه‌های درخت راه‌های هوایی تابع هزینه‌ای که شاخصی از میزان استوانه‌ای بودن است، معرفی و به کار گرفته شد. شایان ذکر است کمینه کردن آن به قرار گرفتن وکسل‌ها در نظام استوانه‌ای منجر گردید. با کاربرد رویکرد جدید اتصال فازی راه‌های هوایی تا لایه چهارم با دقت ۹۲/۹۲٪ استخراج شدند. با استفاده از فرایند بهینه‌سازی در بطن رویکرد جدید اتصال فازی، ضمن ممانعت از تشکیل نشتی، شاخه‌های درخت راه هوایی تا لایه ششم بخش‌بندی شد. چنان‌که نتایج نشان می‌دهد، الگوریتم پیشنهادی OPT-FC-FCM قادر به تشخیص شاخه‌ها، چهار برابر بیشتر از روش FC-FCM است. تعداد کل شاخه‌های بخش‌بندی شده در روش OPT-FC-FCM ۶۵ شاخه است که نسبت به تعداد کل شاخه‌های استخراج شده از روش FC-FCM (با ۱۵ شاخه) ۴ برابر بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: بخش‌بندی راه‌های هوایی، اتصال فازی، بهینه‌سازی شکل، تخمین مرکز

*مهم‌دار مکاتبات

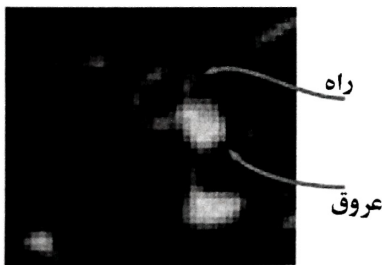
نشانی: تهران، بلوار کشاورز، خیابان پرسینا، دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشکده پزشکی، گروه مهندسی و فیزیک پزشکی

تلفن: ۶۶۲۶۶۳۸۳، دورنگار: ۶۶۲۳۸۶۳۰، پیام نگار: ahmadiani@sina.tums.ac.ir

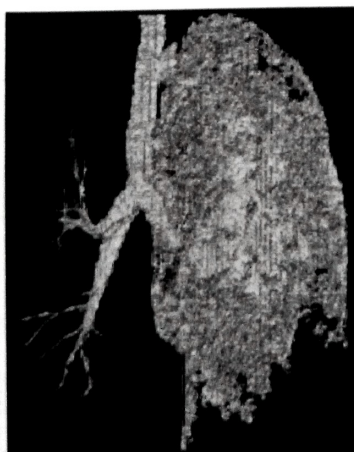
۱- مقدمه

گسستگی‌ها ممکن است مشکلاتی در حین بخش‌بندی ایجاد کند که به خطاهای قبل و بعد از بخش‌بندی منجر شود. اندازه‌های مختلف راه‌های هوایی، در بخش‌های مختلف مجموعه داده^۱ و مجاور بودن آنها با عروق مربوط به سیستم قلبی-عروقی دشواری‌هایی در پیاده‌سازی الگوریتم بخش‌بندی به همراه خواهد داشت (شکل ۱).

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در فرایند بخش‌بندی راه‌های هوایی، نشتی به نواحی خارجی لوله راه‌های هوایی^{۱۱} است. نشتی به علت باریک بودن دیواره راه‌های هوایی جدا کننده لوله هوایی از بافت اصلی اطراف، پدید می‌آید. به عبارت دیگر بافت اصلی ریه الگویی مشابه با راه‌های هوایی کوچک دارد. اثر جزئی حجم و اغتشاش^{۱۲}، قابلیت تفکیک دیواره راه‌های هوایی را به شدت کاهش می‌دهد که این امر می‌تواند به عبور نتیجه بخش‌بندی از میان دیواره راه هوایی و بروز پدیده نشتی منجر شود [۵]. در مورد بخش‌بندی تصاویر CT بیماران مبتلا به آمفییزم نیز یک نشتی شدید اتفاق می‌افتد (شکل ۲) [۳].



شکل ۱- مجاورت عروق و راه‌های هوایی



شکل ۲- بروز نشتی در موارد بیماری

بخش‌بندی راه‌های هوایی با هدف آگاهی از ساختار درخت راه هوایی در تشخیص، مطالعه و درمان اختلال ریه‌ها و فعالیت سیستم تنفسی انجام می‌شود. ضمن اینکه اولین مرحله در فرایند برونکوسکوپی^۱ مجازی، بخش‌بندی تصاویر اخذ شده از سطح قفسه سینه بیمار است. از سوی دیگر برای تعیین اندازه استنت^۲ نیز اطلاع از اندازه شاخه‌های درخت راه هوایی ضروریست، این کاربرد نیز لزوم بخش‌بندی راه‌های هوایی را نشان می‌دهد [۱، ۲].

۱-۱- مشکلات بخش‌بندی راه‌های هوایی

بخش‌بندی راه‌های هوایی امر دشواری است. محدودیت ذاتی کیفیت تصاویر CT^۳ یکی از علل آن است. ساختارهای مختلف در شش به وسیله تفاوت موجود در مقدار HU^۴ که به صورت مقادیر سطوح خاکستری در تصویر دیده می‌شوند، از هم قابل تشخیص‌اند. اما اگر راه هوایی به موازات صفحه تصویر شیب داشته باشد، مقدار HU راه هوایی افزایش می‌یابد. میزان HU راه هوایی با کاهش قطر راه هوایی در نتیجه اثر جزئی حجم، افزایش می‌یابد. حرکات سیستم تنفسی و قلبی هنگام اخذ تصاویر، تشخیص راه‌های هوایی با قطر کم را دشوار می‌سازد و کاربرد ECG گیتینگ^۵ و کنترل تنفس، کیفیت تصویر را برای تشخیص این راه‌های هوایی کوچک، بهبود نخواهد بخشید. اثر جزئی حجم در برخی موارد، کنتراست بین راه هوایی و دیواره راه هوایی را کاهش می‌دهد [۳]. بنابراین راه‌های هوایی باریک یا تنگ شده ممکن است در نتایج بخش‌بندی از هم گسسته یا منقطع پدیدار شوند.

علی‌رغم پیشرفت و بهره‌گیری از الگوریتم‌های بازسازی قدرت تفکیک فضایی بالا^۶ در تصاویر CT، اگر محور شش بر صفحه تصویر عمود نباشد، استخراج دقیق راه‌های هوایی به علت اثر جزئی حجم^۷ (PVE) محدود می‌شود. آرتیفکت‌های بازسازی^۸ تصویر، مانند آنچه هنگام استفاده از کرنل^۹ تیز فرکانس بالا رخ می‌دهد، ممکن است به گسسته شدن راه‌های هوایی بخش‌بندی شده منجر شود [۴]. این

¹ Bronchoscopy
⁵ ECG Gating
⁹ Kernel

² Stent
⁶ High Spatial Resolution Reconstruction
¹⁰ Dataset

³ Computed Tomography
⁷ Partial Volume Effect
¹¹ Extra-luminal

⁴ Hounsfield Unit
⁸ Reconstruction Artifacts
¹² Noise

۲-۱- مروری بر روش‌های مقابله با پدیده ناشتی

در روش کنترل ناشتی که به وسیله لا^{۱۳} و هنگ^{۱۴} [۴]، موری^{۱۵} [۵] و کیارلی^{۱۶} [۶] به کار برده شد، اگر حجم بین دو تکرار فرایند بخش‌بندی افزایش ناگهانی نشان دهد به عنوان نشانه ناشتی شناخته شده و فرایند تکراری متوقف می‌شود و با تنظیم مجدد متغیرها، بخش‌بندی از سر گرفته می‌شود.

در مطالعه دیگری از مشاهده شعاع جبهه موج (در الگوریتم بخش‌بندی راه هوایی بر اساس انتشار جبهه موج) و مقایسه آن با شعاع میانگین شاخه قبلی، ناشتی تشخیص داده می‌شود [۷]. افزایش ناگهانی شعاع، نمایانگر ناشتی است و الگوریتم در شاخه مزبور متوقف می‌شود.

تی‌شیرن^{۱۷} به همراه سونکا^{۱۸} و همکارانش درباره بخش‌بندی راه‌های هوایی مطالعه و روش بخش‌بندی بازسازی ساختار درختی با استفاده از اتصال فازی را پیشنهاد کردند [۸]. روش مبتنی بر اتصال فازی پیشنهادی با وجود مزایایی مانند غلبه بر اغتشاش، از لحاظ محاسباتی نسبتاً پیچیده است. کاهش زمان محاسبه با انجام بخش‌بندی در ROI^{۱۹}های کوچک، امکان‌پذیر است. ROI-ها منطبق بر طول شاخه مورد بخش‌بندی به کار رفته است که مزایایی دارد، از جمله تشخیص زودهنگام ناشتی که به جای بخش‌بندی کل حجم مجموعه داده که از وقوع ناشتی در یک شاخه پس از بخش‌بندی آن اطلاع حاصل شده و نسبت به تنظیم متغیرها و تکرار بخش‌بندی در همان شاخه اقدام می‌شود. روشن است که این روش زمان کمتری به طول می‌انجامد. هرچند فرایند تکرار بخش‌بندی پس از وقوع ناشتی نیز چنان که در روش پیشنهادی ما مطرح خواهد شد، قابل بهبود است.

در این مقاله فرض بر آن است که ناشتی ساختار اسفنجی دارد و برای تشخیص آن از یک عملگر مورفولوژی استفاده می‌شود. فرایند تشخیص ناشتی در این مقاله به این صورت است که پس از اعمال بخش‌بندی در یک ROI مسیر مرکزی نتیجه بخش‌بندی در آن ROI (که اندازه آن بر اساس سعی و خطا به نحوی انتخاب شده است که یک شاخه را دربرگیرد)

استخراج می‌شود در صورتی که این مسیر مرکزی مشابه کرنل توپولوژیکی که اندازه آن در همه جا یکسان است، نباشد ناشتی تشخیص داده می‌شود و با تغییر متغیرهای الگوریتم اتصال فازی، ROI مذکور مجدد بخش‌بندی می‌شود. این فرایند تشخیص ناشتی و تکرار بخش‌بندی زمان بر است. به علاوه این فرض ممکن است همواره درست نباشد. برای مثال در بیماری آمفیوزم، شیء در تصویر CT ظاهر می‌شود که همان شدت روشنایی هوای داخل راه‌های هوایی را دارد بنابراین ناشتی در موارد بیماری ممکن است به خوبی تشخیص داده نشود. برای تشخیص ناشتی از آنجایی که قطر در هر شاخه تا شاخه دیگر به ندرت تغییر می‌کند، می‌توان از روش دیگری بهره گرفت. به عنوان مثال می‌توان از نسبت مساحت دو شاخه خواهر برای آستانه‌گذاری استفاده کرد [۹].

در روش‌های پیشین بخش‌بندی راه‌های هوایی به‌طور کلی استراتژی مقابله با ناشتی به صورت راه‌کارهایی برای برطرف کردن آن پس از وقوع و تکرار بخش‌بندی بوده است، هرچند در یکی از روش‌ها که به وسیله کیارلی ارائه شد برای مقابله با ناشتی، از اعمال فیلتر میانه^{۲۰} به عنوان پیش پردازش نیز استفاده شده است [۶].

امکان تشخیص ناشتی تنها پس از رشد آن و زمان‌بر بودن تکرار بخش‌بندی با متغیرهای جدید به منظور حصول نتیجه بخش‌بندی با ناشتی کمتر، ما را به سمت ارائه یک رویکرد جدید در بهره‌گیری از مزایای روش اتصال فازی همراه با روش بهینه‌سازی مبتنی بر ویژگی‌های شکل^{۲۱} (OPT-FC-) (FCM) برای جلوگیری از تشکیل ناشتی هدایت کرد. روش کلی کار در این مقاله به این صورت است که پس از آماده‌سازی حجم داده، با اخذ مؤلفه‌های اتصال فازی از طریق اعمال خوشه‌یابی فازی و افزودن اطلاعات مکانی طبق مرجع [۱۰]، بخش‌بندی اولیه صورت می‌گیرد. در هر مرحله بهینه‌سازی شکل انجام شده و بخش‌بندی ادامه می‌یابد.

¹³ Law¹⁷ Tshirren²¹ Optimized Fuzzy Connectivity Clustering¹⁴ Heng¹⁸ Sonka¹⁵ Mori¹⁹ Region Of Interest¹⁶ Kiarly²⁰ Median

۲- روش پیشنهادی

۲-۱- FC-FCM

هر یک از دو خاصیت اصلی تصاویر یعنی وجود همگونی در وکسل^{۲۲}های متعلق به یک شیء و وجود یک ارتباط در هم آمیخته بین آنها، در روش های متداول بخش بندی به تنهایی در نظر گرفته شده اند. روش اتصال فازی با بهره گیری همزمان از دو خاصیت مذکور و با در نظر گرفتن خاصیت فازی ذاتی تصاویر پزشکی، الگوریتم کارامدی به منظور بخش بندی ساختارهای پیچیده مانند راه های هوایی است. رویکرد جدید اتصال فازی مبتنی بر خوشه یابی فازی FCM، که تحت عنوان FC-FCM به وسیله همین گروه مطرح شده است که ضمن عدم نیاز به تعیین متغیرهای اولیه، فضای جستجو نیز با بهره گیری از تابع عضویت فضایی فازی در فرایند برگشتی رشد هسته اولیه محدود شده است [۱۰].

در رویکرد جدید با استفاده از الگوریتم FCM در پی به دست آوردن مؤلفه مبتنی بر همگونی هستیم. برای اخذ رابطه فضایی بین وکسل ها و رشد نتیجه بخش بندی از کرنل یکنواخت H با ضریب مشخصی استفاده می کنیم.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

با کانوالو کردن^{۲۳} کرنل H در هر مرحله، وکسل های همسایگی ۲۶ (همسایگی در فضای سه بعدی) برای محاسبه مؤلفه همگونی در نظر گرفته می شوند. رابطه هم خانوادگی سراسری بر اساس ترکیب بازگشتی^{۲۴} ارائه شده در زیر صورت می پذیرد:

$$\mu_{s\text{-updated}}^i = H * \mu_T^i \quad (1)$$

$$\mu_s^{i+1} = \max(\mu_{s\text{-updated}}^i, \mu_T^i) \quad (2)$$

$$\mu_T^{i+1} = \min(\mu_s^{i+1}, \mu_G^{i+1}) \quad (3)$$

که $\mu_{s\text{-updated}}^i$ از طریق کانوالو کردن تابع عضویت کلی^{۲۴}

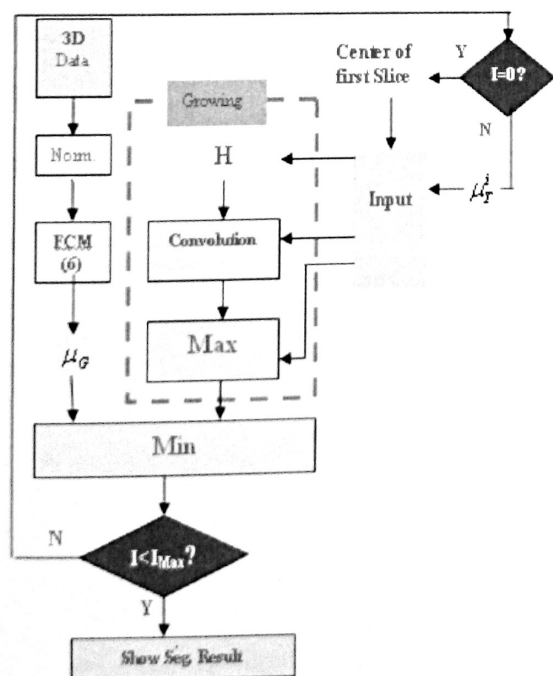
مرحله i با H حاصل می شود.

کانوالو کردن این ماسک در هر مرحله و سپس اعمال تابع max، گسترش ناحیه حاصل از بخش بندی جاری، به ۲۶ همسایگی اطراف و در واقع در نظر گرفتن وکسل های

همسایگی ۲۶ به منظور کسب رابطه همگونی است. در حقیقت، ارتباط همگونی بین وکسل های ناحیه جاری از نظر سطح خاکستری با وکسل های همسایگی ۲۶ آن از این طریق بررسی می شود و تابع عضویت فضایی مرحله جاری، μ_T^{i+1} ، به صورت بازگشتی، چنانچه در رابطه (۲) نشان داده شده است، به دست می آید. عملگر max به کار رفته در این رابطه، عملگر max مجموعه های فازی است.

μ_T در واقع تابع عضویت کلی ناحیه راه های هوایی است. در مرحله بعد با اعمال عملگر min مجموعه های فازی بر تابع عضویت سطوح خاکستری μ_G و تابع عضویت فضایی μ_T در هر مرحله تابع عضویت کلی بر همسایگی ۲۶ مورد بررسی به دست می آید که میزان عضویت وکسل به ناحیه راه هوایی را بیان می کند (رابطه (۳)).

پس از پیاده سازی الگوریتم اتصال فازی و حصول نتایج سه بعدی الگوریتم FC-FCM (مطابق نمودار بلوکی شکل ۳) [۱۰]، همان طور که پیش تر بیان شد برای ممانعت از تشکیل نشی نیاز به مرحله بهینه سازی است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل ۳- نمودار بلوکی روش FC-FCM

²² Voxel

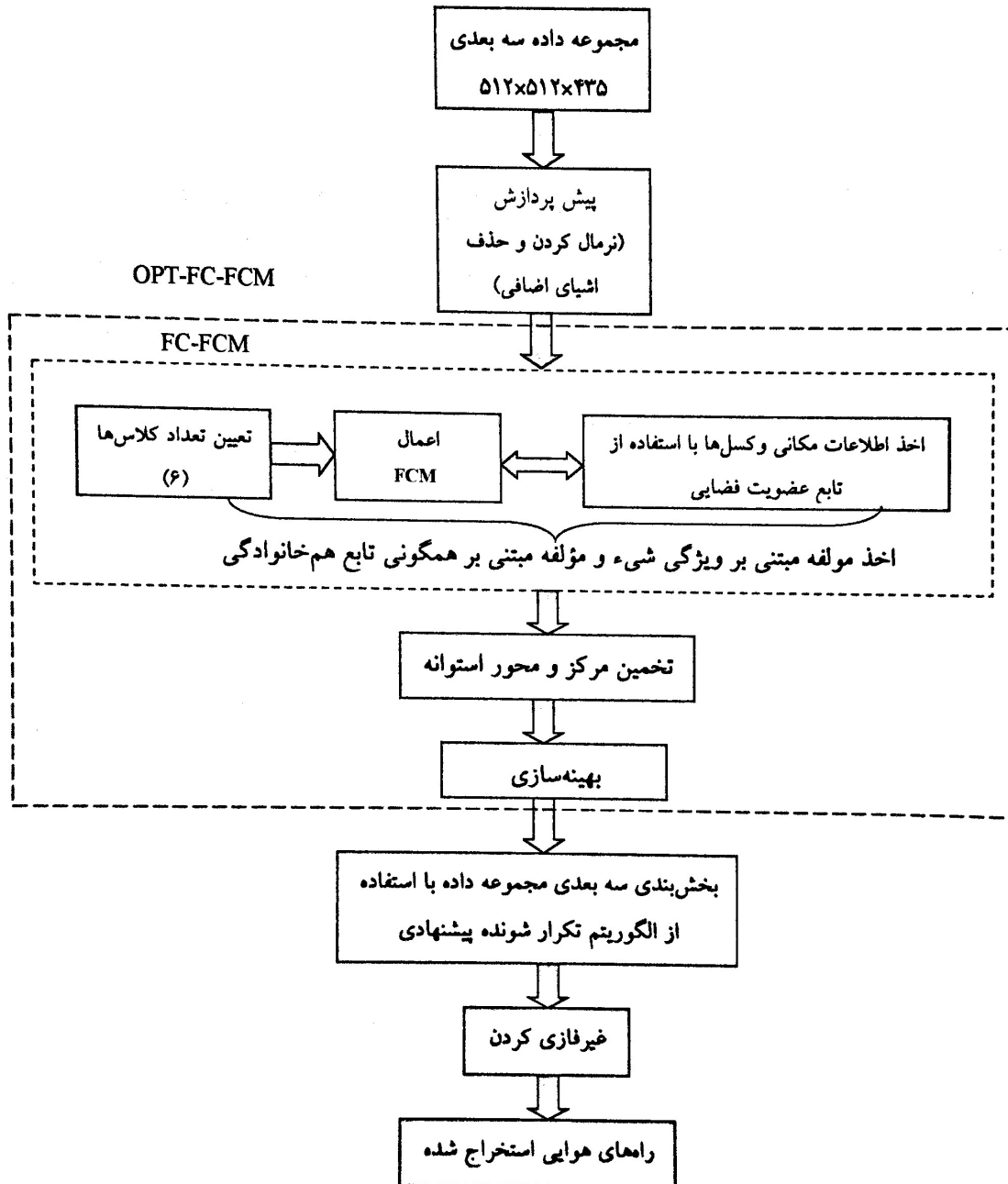
²³ Convolve

²⁴ Recursive Construction

۲-۲-PT-FC-FCM

پس از استفاده از تابع عضویت حاصل از FCM که برای استخراج شاخه‌های انتهایی مناسب است، پدیده نشتی، که همواره در روش‌هایی که تاکنون برای بخش‌بندی راه‌های هوایی به‌کار رفته‌است، حضور دارد، نمایان می‌شود. برای

تکمیل فرایند بخش‌بندی و در عین حال جلوگیری از تشکیل نشتی علاوه بر اطلاعات مکانی همراه با الگوریتم FC-FCM، اطلاعات شکل را وارد کردیم [۱۱]، که آن را روش OPT-FC-FCM نامیده‌ایم. نمودار بلوکی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- شمای کلی نمودار بلوکی الگوریتم پیشنهادی

$$\mu_i^{opt} = f(\mu_i^{old}) \quad (4)$$

با توجه به موارد ذکر شده فوق، شکل کلی تابع هزینه در دو بعد و سه بعد به صورت زیر است که شامل فرم درجه دو عبارت مربوط به ویژگی شکل و عبارت مربوط به خطا، است که به علت حضور آنها بیشتر اشاره شد. ابتدا تابع هزینه را در دو بعد به صورت زیر تعریف کرده‌ایم:

$$J(x, y) = \sum_x \sum_y \left[\alpha \left(\frac{\partial f(\mu_T)}{\partial w} \right)^2 + \beta (f(\mu_T) - \mu_T)^2 \exp\left(-\left(\frac{\partial f(\mu_T)}{\partial w}\right)^2\right) \right] \quad (5)$$

که α و β ضریب هریک از اجزای تابع هزینه را کنترل می‌کنند. تابع هزینه در سه بعد به صورت زیر تعریف شده است:

$$J(x, y, z) = \sum_x \sum_y \sum_z \left[\alpha \left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial w} \right)^2 + \gamma \left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial z} \right)^2 + \beta (f(\mu_i) - \mu_i)^2 \exp\left(-\left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial w}\right)^2 - \left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial z}\right)^2\right) \right] \quad (6)$$

عبارت اول، $\alpha \left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial w} \right)^2 + \gamma \left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial z} \right)^2$ که مربوط به ویژگی‌های استوانه‌ای شکل است. در رابطه تابع هزینه نقش قرارداد و کسل‌ها در یک نظام استوانه‌ای را در حین فرایند بخش‌بندی به عهده دارد. که ضریب α و γ وزن این عبارت را مشخص می‌سازد.

عبارت دوم، $\beta (f(\mu_i) - \mu_i)^2 \exp\left(-\left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial w}\right)^2 - \left(\frac{\partial f(\mu_i)}{\partial z}\right)^2\right)$ نقش هموارسازی و کنترل خطای نهایی و در عین حال غلبه بر مشکل نوسانات هنگام رسیدن به مینیمم‌های محلی را به عهده دارد و ضریب β وزن آن را مشخص می‌سازد که ما آن را عبارت خطا خوانده‌ایم. در این عبارت، در هر دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی، تابع وزن‌دهنده‌ای ضرب شده است. هدف استفاده از این تابع وزن‌دهنده، ایجاد یک روند کاهش نمای، هماهنگ با عبارت اول است که سبب پایداری فرایند در رسیدن به مقدار کمینه تابع هزینه می‌شود.

در حالت دو بعدی، مواقعی که $\partial f / \partial w$ مقدار بالایی دارد، یعنی در حالتی که ناحیه جاری کمترین شباهت را به دایره دارد، ضریب عبارت خطا را با تابع وزن‌دهنده، کاهش می‌دهیم و بالعکس در حالتی که $\partial f / \partial w$ میزان کمی دارد،

بر اساس اطلاعات آناتومیکی موجود، ساختار درختی راه‌های هوایی و شکل کلی آنها در هر شاخه، تقریباً استوانه‌ای است [۱۱]. بنابراین با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی استوانه و اعمال آنها در یک تابع هزینه با هدف برگرداندن مقدار و کسل منشأ نشئی احتمالی به مقدار مناسب، می‌توان به تعریف یک تابع هزینه مناسب برای این امر پرداخت.

شایان یادآور است در هر شکل استوانه‌ای و در حالت کلی مخروطی، اگر نسبت به شعاع زاویه‌ای مشتق گرفته شود، حاصل کمینه است. بنابراین حضور عبارت $\partial f / \partial w$ کاملاً روشن است و چون تابع هزینه باید کمینه شود و در فرایند بهینه‌سازی مشتق‌گیری صورت می‌گیرد، بنابراین تابعی از $\partial f / \partial w$ در نظر گرفته می‌شود که مشتق‌پذیر باشد (به عنوان مثال توان دوی آن) و چون حاصل $\partial f / \partial w$ عددی کوچک‌تر از یک است از انتخاب تابع توان‌دار با توان بالا باید اجتناب کرد، از تابع هزینه باید نسبت به تابع f که تابعی از μ_i ، تابع عضویت حاصل از الگوریتم اتصال فازی است، مشتق گرفته شود. تحت شرط $\partial f / \partial w$ کمینه، اگر و کسلی پس از فرایند مبتنی بر اتصال فازی تشخیص داده شد که متعلق به راه هوایی است باید تحت شرط دایروی / استوانه‌ای بودن نیز تأیید شود، که طی فرایند بهینه‌سازی در نظام استوانه‌ای قرار می‌گیرد. از طرفی حضور عبارتی معرف خطای شکل حاصل از فرایند بهینه‌سازی $f(\mu_T)$ با شکل اولیه μ_T در تابع هزینه ضروریست، علت حضور این عبارت نقش آن در محدود کردن میزان f در حوالی μ_T و نیز هموار کردن خطا است. چراکه پاسخ کمینه شدن عبارت اول می‌تواند استوانه‌هایی (یا دایری) باشد که از μ_T اولیه فاصله داشته باشند و در عین حال شروط استوانه‌ای بودن را دارا باشند، حضور این عبارت مانع دور شدن پاسخ از حوالی μ_T می‌شود. هدف از فرایند بهینه‌سازی، تعیین تابعی از μ_T است که برای دستیابی به آن از کمینه کردن تابع هزینه‌ای بهره می‌گیریم که کمینه آن هنگامی رخ می‌دهد که f که همان تصویر است بیشترین شباهت را به استوانه (دایره در دو بعد) داشته باشد. تصویر خروجی می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

ضریب η در هر تکرار پس از قراردادن f_{new} در تابع هزینه و چک کردن روند کاهش میزبان تابع هزینه تغییر می‌یابد، به‌طور مثال چنانچه f_{new} حاصل، میزان تابع هزینه را افزایش دهد، ضریب η به نصف میزان فعلی، تغییر داده می‌شود.

فرایند بهینه‌سازی شکل در روند تکرارشونده الگوریتم پیشنهادی اتصال فازی وارد می‌شود و در هر تکرار پس از تعیین μ_T نهایی آن را بهینه می‌سازد. این روند تکمیل شده در نمودار بلوکی شکل ۴ قابل مشاهده است.

پیش از بررسی نحوه عملکرد فرایند بهینه‌سازی، اشاره به این نکته ضروری است که برای انجام بهینه‌سازی در ابتدای فرایند تعیین ضرایب α ، β و γ و شرایط اولیه تابع هزینه ضروری است. شرایط اولیه در روند اعمال بهینه‌سازی بر مجموعه داده شبیه‌سازی شده، تغییر داده خواهد شد و اثر این تغییر بر نتایج بررسی می‌شود. اما در روش پیشنهادی OPT-FC-FCM برای بخش‌بندی راه‌های هوایی بدیهی است که شرایط اولیه در هر تکرار روابط بازگشتی مربوط به FC-FCM همان تابع عضویت کلی حاصل در آن مرحله در نظر گرفته می‌شود.

تأثیر تغییر ضرایب α و β که در حقیقت تأثیر عبارات تابع هزینه را تغییر می‌دهند نیز به تفصیل نشان داده خواهد شد. چنانچه مشاهده خواهید کرد، مستقل از میزان α و β و شرایط اولیه، روند بهینه‌سازی، به علت استفاده از الگوریتم GD و تابع هزینه مناسب، پایدار است.

۲-۳- مجموعه داده

۲-۳-۱- مجموعه داده شبیه‌سازی شده

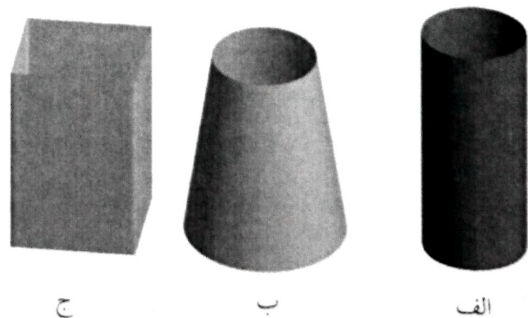
برای نمایش کارایی تابع هزینه در دو بعد ابتدا یک مجموعه از دوایر درون هم ایجاد شده است، سپس با اضافه کردن اغتشاش گوسین^{۲۶} با واریانس یک به شعاع دوایر تغییر شکل در دوایر ایجاد شده است. این نوع اغتشاش به منظور مدل کردن تأثیر بخش‌بندی نادقیق و منشأ نشتی حاصل از آن انتخاب شده است. توجه به این امر حائز اهمیت است که این نوع اغتشاش برای ایجاد داده شبیه‌سازی شده مشابه

پاسخ در حوالی μ_1 است و تابع وزن‌دهنده، ضریب عبارت خطا را افزایش می‌دهد.

در حالت سه‌بعدی، مواقعی که $\partial f / \partial \omega$ و $\partial f / \partial z$ مقدار بالایی دارند، یعنی در حالتی که ناحیه جاری کمترین شباهت را به استوانه دارد، ضریب عبارت خطا را با تابع وزن‌دهنده، کاهش می‌دهیم و به‌طور معکوس در حالتی که $\partial f / \partial \omega$ و $\partial f / \partial z$ میزان کمی دارند، پاسخ در حوالی μ_1 است و تابع وزن‌دهنده، ضریب عبارت خطا را افزایش می‌دهد. برای بیان چگونگی عملکرد فرایند بهینه‌سازی بر اساس تابع هزینه معرفی شده، میزان تابع هزینه برای یک شکل استوانه‌ای، یک مخروط و یک مکعب مستطیل در شکل ۵ آورده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، مقدار عبارت اول تابع هزینه در شکل استوانه‌ای شبیه‌سازی شده صفر، در شکل مخروطی کم و در شکل مکعبی زیاد است. این مقادیر بیانگر آن است که تابع هزینه تعریف شده، شاخص مناسبی برای تعیین میزان استوانه‌ای بودن است.

برای دستیابی به ناحیه‌ای با بیشترین شباهت به استوانه تابع هزینه باید کمینه شود، برای یافتن f_{new} چنانچه در رابطه (۷) نمایان است از الگوریتم حداکثر شیب^{۲۵} (GD) استفاده می‌شود.

$$f_{new} = f_{old} - \eta \frac{\partial f}{\partial f} \quad (7)$$



الف) $(\partial f / \partial \omega)^2 = 0.054045$ & $(\partial f / \partial z)^2 = 0$
 ب) $(\partial f / \partial \omega)^2 = 0.047267$ & $(\partial f / \partial z)^2 = 1.7492$
 ج) $(\partial f / \partial \omega)^2 = 36129.7825$ & $(\partial f / \partial z)^2 = 0$

شکل ۵- اشکال شبیه‌سازی شده

جدول ۱- مجموعه داده‌ها و مشخصات آنها

اندازه	ضخامت اسلایس ^{۲۷}	فاصله پیکسل‌ها	مجموعه داده
۵۱۲×۵۱۲×۲۳۰	۰/۶۲۵ mm	۰/۷، ۰/۷ mm	۱
۵۱۲×۵۱۲×۲۷۲	۰/۶۲۵ mm	۰/۷، ۰/۷ mm	۲
۵۱۲×۵۱۲×۲۴۹	۰/۶۲۵ mm	۰/۹۷، ۰/۹۷ mm	۳
۵۱۲×۵۱۲×۳۹	۰/۶۲۵ mm	۰/۷، ۰/۷ mm	۰-۱

۱-۳- شیب‌سازی

عبارت‌های تابع هزینه (عبارت ویژگی شکل و عبارت خطا) در یک تعامل همگرا در جهت کمینه شدن J عمل می‌کنند. بدیهی است وزن (α و β) هر یک از عبارت‌های مذکور می‌تواند بر سرعت همگرایی الگوریتم و مقدار حداقل تابع هزینه (J_{min}) مؤثر باشند.

۱-۱-۳- تأثیر تغییر α

تأثیر تغییر α در شکل ۶ قابل مشاهده است. با نظر به شکل ۶ مشخص است که با افزایش مقدار α سرعت همگرایی کاهش می‌یابد و فرایند بهینه‌سازی در تعداد تکرار بیشتری به مقدار کمینه می‌رسد. روند کاهشی نمایی حکایت از رویه کلی همگرا بودن الگوریتم علی‌رغم مقدار نامناسب α دارد.

۲-۱-۳- تأثیر تغییر ضریب β

عبارت دوم نقش هموارسازی خطا و عبور از مینیمم‌های محلی را دارد که این امر از مشکلات روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گرادینان^{۲۸} است. در واقع نقش عبارت دوم محدود کردن پاسخ به مقدار اولیه‌ای است که در کاربرد بخش‌بندی همان μ است. تأثیر تغییر β در شکل ۷ قابل مشاهده است در صورت مناسب نبودن شرط اولیه^{۲۹} با بهینه کردن β می‌توان در تعداد تکرار کمتر به پاسخ مناسب، J کمتر، دست یافت.

نشتی که در داده واقعی رخ می‌دهد و برای تعیین کارایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی به‌کار می‌رود. از طرف دیگر می‌توان این مدل را وجود پدیده ناهمگنی در تصویر دانست که بهینه‌سازی قادر به تصحیح آن است. داده شامل مجموعه دوایری که درون هم قرار گرفته‌اند، به منظور پیاده‌سازی و نمایش نتایج دو بعدی بهینه‌سازی به‌کار رفته است. مدل تغییر شکل کلی از شکل دایره‌ای نیز داده شبیه‌سازی شده است.

در شبیه‌سازی سه‌بعدی پس از ایجاد یک استوانه با افزودن اغتشاش گوسین مشابه آنچه در شبیه‌سازی دو بعدی عنوان شد برای تغییر شکل به شعاع آن اضافه شده است.

۲-۳-۲- مجموعه داده واقعی

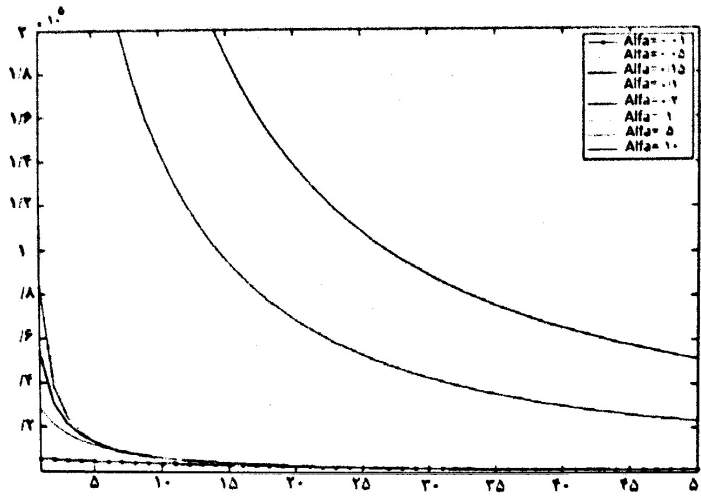
در این بخش نتایج بخش‌بندی بر مجموعه داده تصاویر CT که از مرکز تصویربرداری بیمارستان امام خمینی تهیه شده است، ارائه خواهد شد.

درخت راه هوایی در یک مجموعه داده سه‌بعدی CT، به صورت یک مجموعه ساختار لوله‌ای متصل تیره است که شاخه‌ای بوده و در حین شاخه‌دار شدن قطر آن کاهش می‌یابد. در جدول ۱ مجموعه داده‌های مورد استفاده در مقاله حاضر و مشخصات آنها آورده شده است.

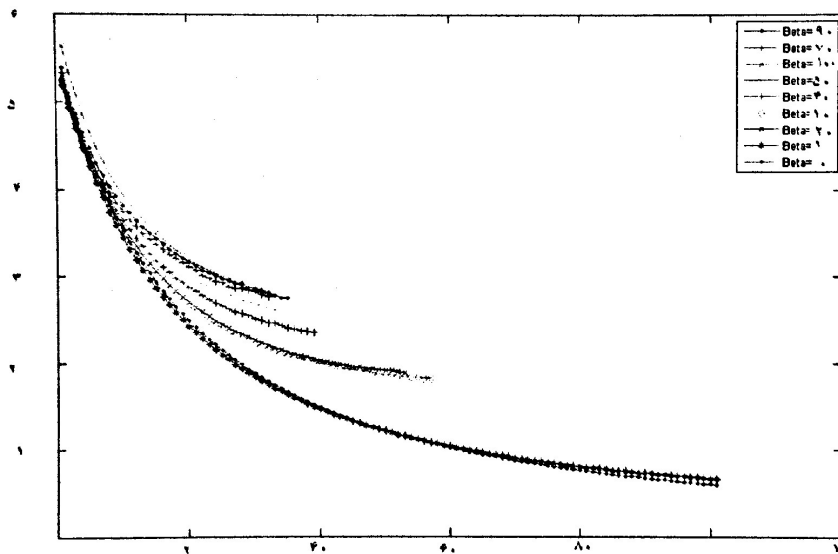
۳- نتایج

الگوریتم FC-FCM در دست‌یابی به شاخه‌های انتهایی پس از لایه سوم، توانا نیست، این بدان علت است که تابع عضویت سطح خاکستری، μ_o برای استخراج این شاخه‌ها باید به نحوی تغییر کند که اثر جزئی حجم در نظر گرفته شود. اثر جزئی حجم به کمتر شدن میزان سطح خاکستری شاخه‌های انتهایی منجر می‌گردد که پس از تغییر μ_o به منظور بخش‌بندی شاخه‌های انتهایی با پدیده نشتی مواجه می‌شویم. بنابراین برای استخراج این شاخه‌ها به افزودن فرایند بهینه‌سازی در بطن روابط بازگشتی (روش پیشنهادی OPT-FC-FCM) اقدام شد که در ادامه درباره نتایج آن مباحثی مطرح می‌شود.

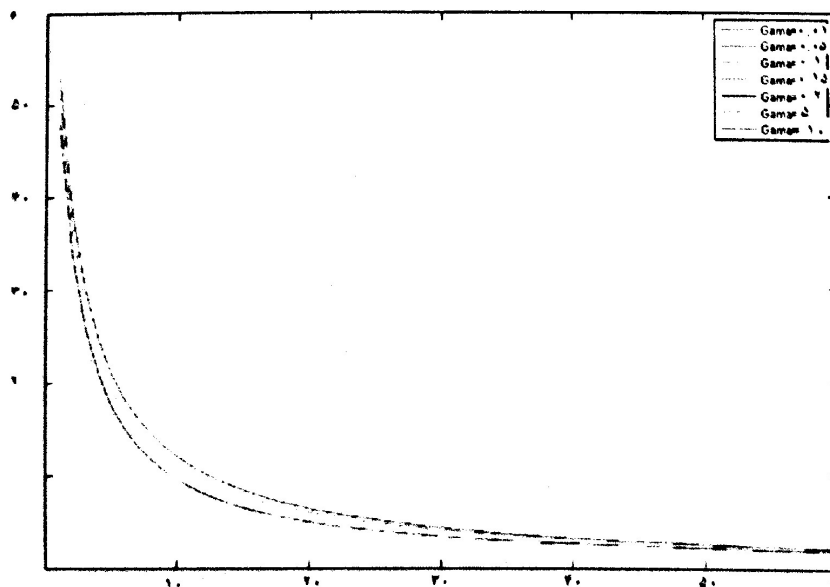
^{۲۷} Slice^{۲۸} Gradient Based^{۲۹} Input Image×Initial Condition= 10



شکل ۶- تأثیر تغییر ضریب α در مقدار J



شکل ۷- تأثیر تغییر ضریب β در مقدار J



شکل ۸- تأثیر تغییر ضریب γ در مقدار J

۳-۱-۳- تأثیر تغییر ضریب γ

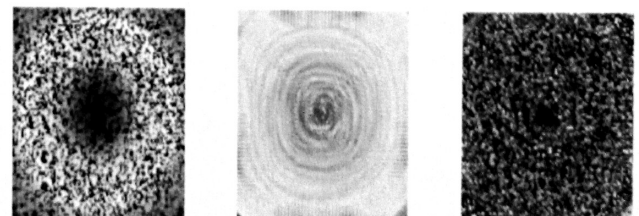
تأثیر ضریب γ مشابه رفتار ضریب α است، که در شکل ۸ نشان داده شده است.

۳-۱-۴- تأثیر شرط اولیه

شرط اولیه در تابع هزینه در عبارت خطا وارد می‌شود، نقش شرط اولیه در عبارت هموارسازی خطاست، در واقع تابع هزینه در حضور عبارت هموارسازی خطا، هنگامی کمینه می‌شود که f دایره‌ای شود و میزان آن از شرط اولیه دور نباشد، زیرا عبارت مربوط به گرادیان در هر دایره‌ای کمینه می‌شود اما در فرایند بهینه‌سازی هر دایره‌ای مورد نظر ما نیست.

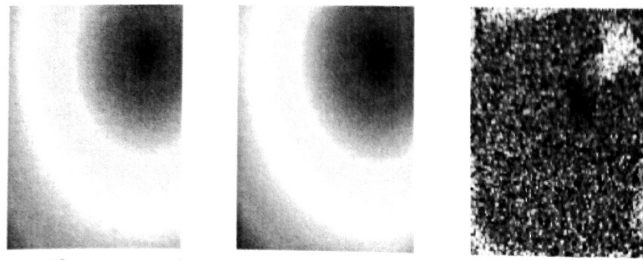
برای نشان دادن توانایی الگوریتم در هموارسازی خطا^{۳۰} و عبور از مینیمم‌های محلی^{۳۱}، این ضرایب را تغییر داده و نتایج را بررسی می‌کنیم. شکل ۹ دایره تغییر شکل یافته و نتیجه اعمال الگوریتم بهینه‌سازی را به همراه تصویر تفاوت آن دو نشان می‌دهد. روشن است که دایره اصلی به وضوح با اعمال الگوریتم بهینه‌سازی با تعداد تکرار ۱۰۰ بازبازی شده‌اند. شکل ۱۰ همان فرایند را با تغییر محل مرکز دایره نشان می‌دهد. الگوریتم شکل دایره‌ی را با مرتب کردن پیکسل‌ها روی دایره اصلی دوباره منظم می‌کند. این امر توانایی الگوریتم در بازبازی شکل دایره‌ی با وجود تغییر مرکز را نشان می‌دهد. این روش بهینه‌سازی که در بطن روش اتصال فازی از آن بهره گرفته‌ایم برای ممانعت از نشتی به محض تشکیل آن بی‌نیاز از تکرار بخش‌بندی و یا تنظیم مجدد متغیرها به کار می‌رود.

شکل ۱۱ توانایی الگوریتم در بازبازی شکل دایره‌ی پس از تغییر شکل کلی از دایره به مربع و سپس بازبازی نظام دایره‌ی را نشان می‌دهد.



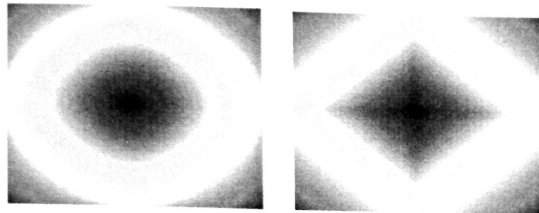
الف) تصویر اغتشاش (ب) دایره بازبازی شده (ج) دایره تغییر شکل یافته

شکل ۹- بهینه‌سازی با تعداد تکرار ۱۰۰

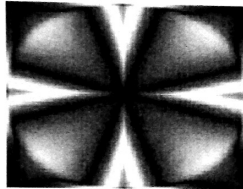


الف) تصویر اغتشاش (ب) دایره بازبازی شده (ج) دایره تغییر شکل یافته

شکل ۱۰- بهینه‌سازی با تعداد تکرار ۱۰۰



الف) تغییر شکل کلی (ب) دایره بازبازی شده

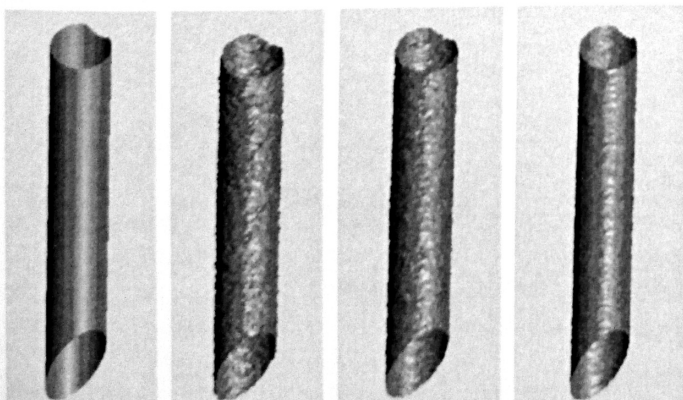


ج) تصویر اختلاف

شکل ۱۱- بهینه‌سازی در تغییر شکل کلی

۳-۱-۵- شبیه‌سازی سه‌بعدی

نتایج حاصل از اعمال فرایند بهینه‌سازی با ۱۰۰ و ۵۰۰ تکرار در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین در این شکل مقادیر تابع هزینه J برای استوانه اصلی و تغییر شکل یافته و بهینه‌سازی شده، به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی نشان داده شده‌اند. بهبود شکل و نزدیک شدن آن به استوانه پس از بهینه‌سازی روشن است.



الف) $J=31.9675$ (ب) $J=130.5656$ (ج) $J=9.6255e+003$ (د) $J=0.05$

شکل ۱۲- بهینه‌سازی در سه بعد، تعداد تکرار در (ج) ۱۰۰ و در

(د) ۵۰۰ است.

³⁰ Error Smoothness

³¹ Local Minima

۳-۲- نتایج واقعی

روش پیشنهادی بر تصاویر CT راه‌های هوایی قفسه سینه اعمال شده است. برای نشان دادن کارایی بهینه‌سازی در ممانعت از تشکیل نشتی، شاخه‌ای که منشأ تشکیل نشتی بود در اسلایس شروع آن شاخه تا انتهای آن شاخه در چندین اسلایس بعد با و بدون بهینه‌سازی جداگانه بخش‌بندی شد.

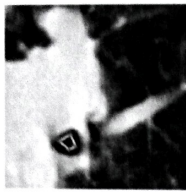
اصلی‌ترین هدف ما از ارائه روش OPT-FC-FCM، دستیابی به شاخه‌های متعلق به لایه‌های بعد از لایه سوم ضمن جلوگیری از بروز پدیده نشتی بود. طبق مطالعات مختلف بررسی تعداد لایه‌های استخراج شده از درخت راه هوایی از جمله روش‌های مرسوم برای ارزیابی نتایج بخش‌بندی راه‌های هوایی است [۱۲]. لایه‌های درخت راه هوایی نسل^{۳۲} خوانده می‌شوند. ما نیز در این بخش برای ارزیابی نتایج حاصل از روش پیشنهادی OPT-FC-FCM از این معیار استفاده می‌کنیم. در جدول ۲ تعداد لایه‌های استخراج شده به وسیله روش پیشنهادی با روش‌های دیگر مقایسه شده‌اند.

در شکل ۱۳ درخت راه‌های هوایی استخراج شده پیش از اعمال بهینه‌سازی و پس از آن نشان داده شده است. شایان ذکر است تعداد لایه‌های استخراج شده پیش از بهینه‌سازی محدود به لایه سوم است و چنانکه مشخص است لایه‌های استخراج شده پس از اعمال بهینه‌سازی شش است. در شکل ۱۴ لایه‌های استخراج شده از دو نمای متفاوت نمایش داده شده است.

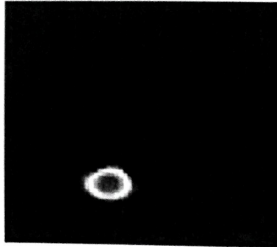
جدول ۲- تعداد لایه‌های استخراج شده به وسیله روش پیشنهادی

در مقایسه با روش‌های دیگر

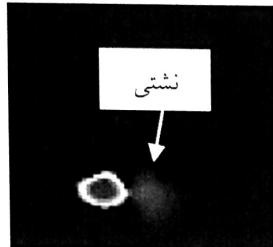
روش	نسل	نشتی
FCM	۲	Y
FC-FCM	۳-۴	N
OPT-FC-FCM	۵-۶	N



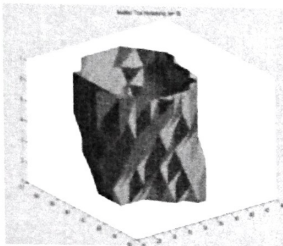
الف



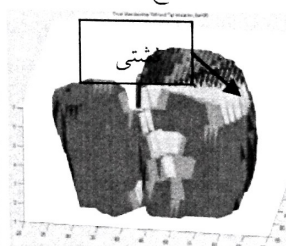
ب



ج

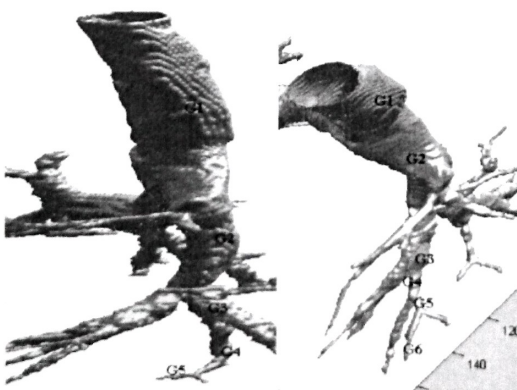


د



ه

شکل ۱۳- الف) اسلایس آغاز شاخه منشأ نشتی؛ ب) بخش‌بندی دوبعدی بدون بهینه‌سازی در همان اسلایس؛ ج) بخش‌بندی دوبعدی با بهینه‌سازی در همان اسلایس؛ د) بخش‌بندی سه‌بعدی بدون بهینه‌سازی، نشتی رشد کرده قابل مشاهده است و ه) بخش‌بندی سه‌بعدی همراه با بهینه‌سازی



شکل ۱۴- تعداد لایه‌های استخراج شده شاخه‌های راه‌های هوایی

۴- نتیجه‌گیری

تابع هزینه معرفی شده براساس ویژگی کمینه بودن گرادیان نسبت به شعاع و محور در ساختار استوانه‌ای به همراه عبارت کنترل خطا به عنوان شاخص مناسب برای ارزیابی میزان استوانه‌ای بودن که طی فرایند بهینه‌سازی کمینه

³² Generation

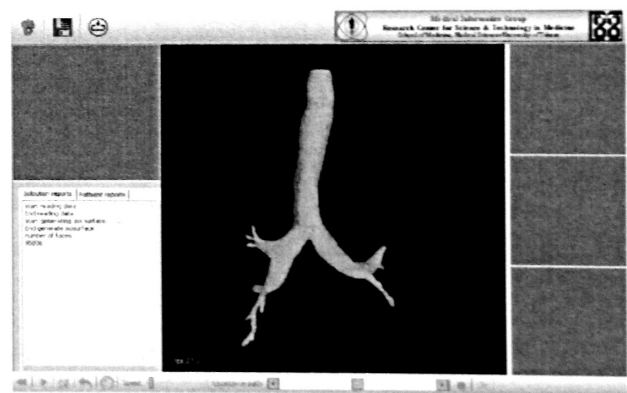
برای روش OPT-FC-FCM مزایای عمده زیر را می‌توان برشمرد:

۱. پیشگیری از تشکیل نشستی در بدو تشکیل (در حد یک وکسل) و نه بعد از آن، با تکیه بر یک فرایند بهینه‌سازی ریاضی مبتنی بر ویژگی‌های شکل؛
۲. قابلیت تنظیم متغیرهای تابع هزینه معرفی شده به منظور قرار دادن وکسل‌های ساختارهای مخروطی وحتی مکعبی در نظام استوانه‌ای؛
۳. حل مشکل روش‌های مبتنی بر گرادیان در عبور از مینیمم‌های محلی با اعمال یک عبارت اضافی در تابع هزینه و امکان تنظیم آن با هدف افزایش سرعت همگرایی در رسیدن به حداقل خطا حتی در صورت نامناسب بودن شرط اولیه. ضمن اینکه وجود این عبارت به‌طور همزمان باعث هموار کردن خطا در تابع هزینه نیز شده است؛
۴. استفاده از ایده اندازه‌گیری گرادیان زاویه‌ای به منظور تشخیص دایروی بودن شیء برخلاف روش‌های متداول مبتنی بر فاصله اقلیدسی، حجم عملیات را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد؛
۵. قابلیت استفاده از فرایند بهینه‌سازی به‌صورت مستقل برای بهبود روش‌هایی که مشکل نشستی در فضای سه‌بعدی را دارند از قبیل روش رشد ناحیه‌ای فازی و غیره.

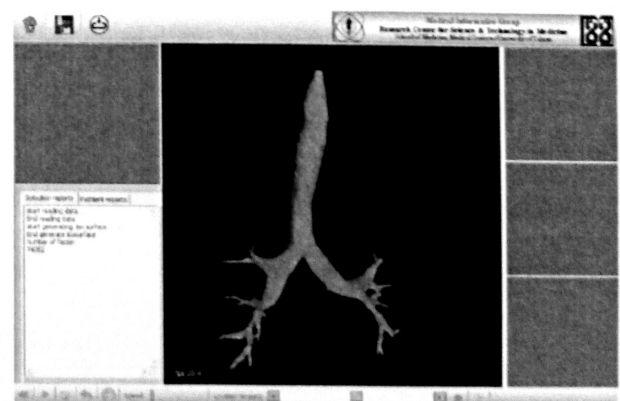
مراجع

- [1] Information about lung cancer, 2007, available from: <http://www.covenanthealth.com>
- [2] Information about Tracheobronchial Stents, 2007, available from: <http://www.medgadget.com>
- [3] Bilgen D., Segmentation and analysis of the human airway tree from 3D X-ray CT images, Master thesis, The university of Iowa, IA, USA, 2000.
- [4] Law T.Y. and Heng P.A., Automated extraction of bronchus from 3D CT images of lung based on genetic algorithm and 3D region growing, in SPIE Proceedings on Medical Imaging, San Diego, CA. 2000; 3979: 906-916.
- [5] Mori K., Suenaga Y. and Toriwaki J., Automated anatomical labeling of the bronchial branch and its application to the virtual bronchoscopy, Medical Imaging, IEEE Transactions on, 2000; 19: 103-114.
- [6] Kiraly A.P., Higgins W.E., McLennan G., Hoffman A. and Reinhardt J.M., Three-dimensional Human Airway

می‌شود. اعمال روند بهینه‌سازی در حین اعمال الگوریتم بخش‌بندی به صورت جای داده شده^{۳۳} و نه ترکیبی (مشابه آنچه در روش‌های گذشته متداول بوده) به‌منظور جلوگیری از تشکیل نشستی مانع از تکرار مجدد فرایند بخش‌بندی است. وارد کردن فرایند بهینه‌سازی مبتنی بر شکل در بطن رویکرد جدید اتصال فازی، به منظور حصول شاخه‌های انتهایی درخت راه هوایی بدون نشستی به دستیابی به لایه‌های پنجم و ششم منجر شد که این امر در روش‌های گذشته بسیار پیچیده، زمان‌بر و با تکیه بر اطلاعات مربوط به مسیر مرکزی بوده است. نتایج حاصل از روش FC-FCM و OPT-FC-FCM در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند. این تصاویر مربوط به نمایش سه‌بعدی راه‌های هوایی استخراج شده در سیستم کمک تشخیصی وی-سی سلوشن^{۳۴} است که در مرکز تحقیقات بیمارستان امام خمینی ایجاد شده است.



الف



ب

شکل ۱۵- الف) نتیجه حاصل از روش FC-FCM؛ ب) نتیجه حاصل از روش OPT-FC-FCM

- [10] Rizi F.Y., Bidgoli J.H., Ahmadian A., Alirezaie J., An Efficient Fuzzy Connectivity Method for Airway Tree Segmentation Using Fuzzy C-mean Algorithm", Biomed 2008, the 4th Kuala Lumpur International Conference on Biomedical Engineering, 2008, Proceedings 21: 501-505
- [11] Levitzky M.G., Pulmonary Physiology. Structure of the Respiratory System, 7th edition, McGraw-Hill's, 2007.
- [12] Park S.J., Kim J.H., Lee S.H., Kim K.G., Comparative assessment of 3D region growing methods for lung airway segmentation: evaluation with pathological and normal cases, IFMBE Proceedings, 2007; 14: 2525-2528.
- Segmentation Methods for Clinical Virtual Bronchoscopy, Academic Radiology, 2002; 9: 1153-1168.
- [7] Schaltholter T., Lorenz C., Carlsen I.C., Renisch S., and Deschamps T., Simultaneous Segmentation and Tree Reconstruction of the Airways for Virtual Bronchoscopy, in SPIE Medical Imaging 2002. Image Processing. San Diego, CA. 2002; 2: 103-113.
- [8] Tschuren J., Hoffman A., McLennan G. and Sonka M., Intrathoracic Airway Trees: Segmentation and Airway Morphology Analysis From Low-Dose CT, IEEE Transaction Medical Imaging, 2005; 24: 113-128.
- [9] Pinho R., Sijbers J., Vos W., Efficient approaches to Intrathoracic airway tree segmentations, IEEE Benelux Symposium, 2007: 531-542.