

بهبود وفقی کنتراست با استفاده از متعادل‌سازی بهینه‌ی هیستوگرام دوبعدی

سحر ایروانی^۱ و مهدی ازوجی^۲

چکیده

در این مقاله، برای بهبود وفقی کنتراست به ارائه و حل یک مسأله‌ی بهینه‌سازی در فضای هیستوگرام‌های دوبعدی پرداخته شده است. برای جلوگیری از بروز اثرات نامطلوب ناشی از دست‌کاری هیستوگرام تصویر، در بیان ریاضی مسأله در این مقاله همانند روش‌های مشابه دیگر، از یک‌سو هیستوگرام بهینه‌ی خروجی از روی هیستوگرامی دوبعدی که بیشترین شباهت را به هیستوگرام دوبعدی تصویر ورودی و نیز توزیع یکنواخت داشته باشد به دست می‌آید و از سویی دیگر برخلاف دیگر روش‌ها، با وزن‌دهی وفقی، اطلاعات محلی مناسبی را نیز در این جستجو در نظر می‌گیرد. نگاشت مناسب با حل این مسأله‌ی بهینه‌سازی به دست آمده و آزمایش‌های گوناگونی که بر روی تصاویر گوناگون انجام شده است، درستی مدل بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. به-کارگیری الگوریتم پیشنهادی بر روی تصاویر متعدد، در مقایسه با روش مرجع به صورت میانگین به بهبود ۷۵ درصدی و ۳ درصدی معیارهای $AMBE_N$ و DE_N منجر شده است.

کلید واژه‌ها

بهبود کنتراست، هیستوگرام دوبعدی، هموارسازی هیستوگرام

۱ مقدمه

روش‌های غیرمستقیم که به دلیل ارائه مستقیم و مبتنی بر درک در سال‌های اخیر توجه بیشتری به آن شده است، خود به چهار گروه دسته‌بندی می‌شوند:

- روش‌هایی که مؤلفه‌های فرکانسی بالا و پایین تصویر را تغییر می‌دهند [۵]؛
- روش‌های مبتنی بر تبدیل [۶-۱۰]؛
- روش‌های مبتنی بر اصلاح هیستوگرام [۱۱-۱۴]؛
- روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم [۱۵].

در این مقاله، مشابه روش‌های گروه سوم برای بهبود کنتراست تصویر، پیکسل‌های تصویر به‌گونه‌ای نگاشت می‌یابد تا سطوح خاکستری استفاده‌نشده‌ی بیشتری از گستره‌ی دینامیکی به‌کارگرفته شود.

متعادل‌سازی هیستوگرام^۱ (HE)، یکی از پرطرفدارترین روش‌های پایه برای بهبود کنتراست تصویر است [۱۶]؛ از این‌رو در مقالات به‌عنوان یکی از روش‌های مورد مقایسه، همواره حضور دارد.

بهبود کنتراست تصویر یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌هایی است که در کاربردهای پردازش تصویر و بینایی ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی روش‌های بهبود کنتراست به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های مستقیم مانند [۱ و ۲] و روش‌های غیر مستقیم مانند [۳ و ۴]. در روش‌های مستقیم، ضمن تعریف معیاری برای اندازه‌گیری کنتراست تصویر، تلاش می‌شود تا از راه بهبود این معیار، کنتراست تصویر بهبود یابد. در روش‌های غیرمستقیم (مانند الگوریتم پیشنهادی این مقاله)، گستره‌ی دینامیکی سطوح خاکستری تصویر برای بهبود کنتراست افزایش داده می‌شود.

این مقاله در فروردین ماه ۱۳۹۴ دریافت، در تیرماه بازنگری و در مردادماه همان سال پذیرفته شد.

۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
رایانامه: iravani@stu.ac.ir

۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
رایانامه: m.ezoji@nit.ac.ir

روشن است که با در نظر گرفتن اطلاعات محلی می‌توان نتیجه مناسب‌تری را در تصویرهایی که حاوی اطلاعات بافتی هستند، به دست آورد. در روش متعادل‌سازی هیستوگرام دوبعدی $(2DHE)^{[19]}$ و نیز اصلاح آن $[20]$ ، برای در نظر گرفتن اطلاعات محلی از هیستوگرام دوبعدی (که حالت کلی‌تر هیستوگرام یک‌بعدی است) استفاده شده است. گزارش مقالات $[19]$ و $[20]$ نشان داده که استفاده از هیستوگرام دوبعدی نسبت به روش‌های دیگر به نتایج بهتری منجر می‌شود.

در مقاله حاضر جهت بهبود کنتراست، روند تکاملی روش HE $[18]$ ، $2DHE$ $[19]$ و سپس $CVCE^2$ $[20]$ مورد بررسی و سپس اصلاح هیستوگرام دوبعدی تصویر با استفاده از طرح یک مسأله‌ی بهینه‌سازی مناسب، مبنای اصلی کار قرار گرفته است. در الگوریتم ارائه‌شده از یک سو، بروز اثرات نامطلوب در نواحی هموار و نیز به وجود آمدن روشنایی و تیرگی بیش از اندازه در تصویر (برخلاف $[19]$) رفع شده است؛ از سویی دیگر برای کنترل میزان بهبود کنتراست، اطلاعات محلی تصویر به صورت وقتی و بدون داشتن پارامترهای تنظیمی متعدد (برخلاف $[15]$ و $[20]$) در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم، نتایج مناسبی در حفظ روشنایی عمومی و نیز جزئیات تصویر که از اهداف بهبود کنتراست تصویر است، به دست آمده است.

مقاله‌ی حاضر در ادامه در چهار بخش سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم هیستوگرام دوبعدی و اصلاح آن معرفی شده و در بخش سوم الگوریتم وقتی پیشنهادی برای بهبود کنتراست تصویر ارائه شده است؛ در بخش چهارم، به ارزیابی کارایی مقاله‌ی ارائه‌شده و مقایسه‌ی آن با الگوریتم‌های دیگر با استفاده از معیارهای کیفی و کمی پرداخته شده است؛ در پایان نیز، جمع‌بندی کار پیشنهادی آورده شده است.

۲ هیستوگرام دوبعدی و اصلاح آن

در تصویر $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ (با فرض $x_1 < x_2 < \dots < x_K$ که K تعداد سطوح خاکستری متمایز را مشخص می‌کند) هیستوگرام دوبعدی یا همان $H_x = \{h_x(m, n) \mid 1 \leq m \leq K, 1 \leq n \leq K\}$ تعداد وقوع سطوح خاکستری x_n را در همسایگی x_m در پنجره‌ای با اندازه‌ی D از پیش تعریف شده‌ی D در کل تصویر محاسبه می‌کند $[19]$. نمونه‌ای از هیستوگرام دوبعدی به ازای مقدارهای گوناگون D ، در شکل (۱) نشان داده شده است (برای نمایش بهتر، لگاریتم مقادیر هیستوگرام دوبعدی نشان داده شده است). همان‌گونه که از شکل ۱ پیدا است به دلیل همبستگی میان مقادیر پیکسل‌های همسایه در تصویر، نمودار هیستوگرام دوبعدی آن در راستای قطری و نزدیک به آن مقادیر بزرگ دارد.

در $[20]$ برای اصلاح هیستوگرام دوبعدی، یافتن هیستوگرام دوبعدی مطلوب طبق رابطه‌ی بهینه‌سازی (۱) به کمینه کردن تابع منجر شده است که از این پس در این مقاله چنین تابعی را تابع هزینه می‌نامیم. جمله‌های سمت راست رابطه‌ی (۱) به ترتیب برای

میانگین سطوح خاکستری در تصویر بهبودیافته به روش HE معمولاً مقداری وسط بازه‌ی دینامیکی است که می‌تواند اثرات نامطلوبی در تصویر خروجی به وجود آورد. برای کاهش تغییرات میانگین روشنایی بین تصویر ورودی و خروجی، روش متعادل‌سازی هیستوگرام دوگانه^۲ ارائه شده است $[11]$. در این روش با هدف حفظ روشنایی عمومی تصویر نسبت به تصویر اصلی، هیستوگرام تصویر بر اساس میانگین سطح خاکستری آن به دو بخش تقسیم می‌شود و بر هر بخش از هیستوگرام تقسیم شده به‌طور جداگانه الگوریتم HE اعمال می‌گردد.

روش متعادل‌سازی هیستوگرام در تصویر چندسطحی^۳ نیز مشابه روش قبل عمل می‌کند؛ با این تفاوت که هیستوگرام تصویر بر اساس حد آستانه‌ای که به‌ازای آن مقدار تابع توزیع تجمعی سطوح خاکستری برابر با نیم است، به دو بخش تقسیم می‌شود $[12]$. گرچه در این دو روش تصاویر مطلوب‌تری نسبت به روش HE تولید می‌گردد؛ ولی نمی‌توان با استفاده از هیچ‌یک از این روش‌ها کنترلی بر میزان افزایش کنتراست داشت؛ در نتیجه جزئیات زیادی از نظر پنهان می‌شود. هم‌چنین این روش‌ها به بروز اثرات نامطلوب در نواحی هموار تصویر یا قسمت‌هایی که نقاط قله را در هیستوگرام به وجود می‌آورند، منجر می‌شوند. از سویی دیگر در این نوع روش‌ها، از اطلاعات محلی تصویر نیز که تأثیر چشم‌گیری بر روی نتایج خواهد داشت، استفاده نشده است.

مدل‌کردن مسأله‌ی بهبود کنتراست تصویر با مسأله‌های بهینه‌سازی مناسب هم در $[17-19]$ بررسی شده است. در $[17]$ طی یک مسأله‌ی بهینه‌سازی محدب^۴، تصویر ورودی را به تصویری با کنتراست بالاتر که هموارترین هیستوگرام را با شرط نگه داشتن روشنایی عمومی تصویر^۵ داشته باشد نگاهشت می‌دهد. در تصاویری که میانگین روشنایی خیلی کم یا خیلی زیاد دارند، به دلیل حفظ میانگین روشنایی تصویر، این روش ممکن است کنتراست قابل قبولی را نشان ندهد.

در $[18]$ برای یافتن هیستوگرام یک‌بعدی تصویر مطلوب، به کمینه کردن فاصله‌ی این هیستوگرام از هیستوگرام تصویر ورودی و نیز توزیع یکنواخت، مشروط به کم بودن انرژی گرادیان هیستوگرام مطلوب پرداخته است. تعدد پارامترها و تنظیم آن‌ها در تابع هزینه^۶ تعریف‌شده یکی از مشکلات این روش است.

در $[15]$ روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک^۷ ارائه‌شده است؛ این روش برای پیدا کردن هیستوگرام مطلوب، معیاری از کنتراست که بر اساس اطلاعات لبه به دست می‌آید را بیشینه می‌کند. وابستگی به تعیین مقادیر اولیه، هم‌گرایی به مقادیر بهینه‌ی محلی و وابستگی سرعت هم‌گرایی به تعداد سطوح خاکستری متمایز در تصویر ورودی، از اشکالات این روش است.

در روش‌های ذکرشده‌ی فوق از هیستوگرام یک‌بعدی برای بهبود کنتراست استفاده شده است و در اکثر آن‌ها اطلاعات محلی در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود.

۳ الگوریتم پیشنهادی

در مسأله‌ی متعادل‌سازی هیستوگرام تصویر، نگاشتی از سطوح خاکستری جستجو شده است که هیستوگرام تصویر پس از اعمال آن به تابع توزیع یکنواخت نزدیک شود. در [۱۸] برای گسترش گستره دینامیکی، نگاشتی مورد توجه قرار گرفت که هم به توزیع یکنواخت یک‌بعدی، u ، (برای به‌دست آوردن بیشترین آنتروپی) نزدیک باشد و هم از هیستوگرام یک‌بعدی تصویر اصلی h_i ، (برای جلوگیری از اثرات نامطلوب) دور نباشد و همان‌گونه که در بخش دوم نشان داده شده است در [۲۰] نیز همین ایده در باره هیستوگرام‌های دو بعدی به‌کار گرفته شده است. در مقاله‌ی حاضر، برای کاهش تعداد پارامترهای موازنه در [۲۰] و نیز کاهش آثار نامطلوب دیداری مانند تیرگی‌ها و روشنایی‌های بیش از اندازه‌ی دیده‌شده در [۱۹]، اصلاح وزن‌دهی شده و وفقی هیستوگرام دو‌بعدی پیشنهاد شده است.

در این مقاله، برخلاف [۲۰] تابع هزینه مطابق رابطه‌ی (۳)، شامل دو جمله است که بر اساس ایده‌ی گفته‌شده، مطابق رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود. جمله‌ی $f(H - H_i)$ تابعی از تفاضل هیستوگرام دو‌بعدی تصویر ورودی و تصویر خروجی است که برای حفظ روشنایی عمومی تصویر باید کمینه شود. کاهش مقدار جمله‌ی $\lambda \|H - U\|^2$ نیز نزدیک شدن به توزیع یکنواخت برای داشتن بیشترین آنتروپی را فراهم می‌آورد.

$$H_o = \arg \min_H \{ f(H - H_i) + \lambda \|H - U\|^2 \} \quad (3)$$

در رابطه‌ی فوق H, H_i, U و H_o به ترتیب هیستوگرام دو‌بعدی اصلاح‌شده، هیستوگرام دو‌بعدی ورودی، توزیع یکنواخت دو‌بعدی و هیستوگرام اصلاح‌شده‌ی خروجی را نشان می‌دهند؛ f نیز تابعی از $H - H_i$ و λ پارامتری برای تنظیم سطح کنتراست است.

برخلاف [۱۹ و ۲۰] در تعریف تابع هزینه‌ی پیشنهادی با توجه به (۳)، نیازی به حضور جمله‌ی هموارساز مبتنی بر مشتق (جمله‌ی سوم رابطه‌ی (۱)) نیست.

در ادامه برای جلوگیری از بروز نویز دانه‌ای در نواحی هموار تصویر، در تعیین شباهت هیستوگرام مطلوب به هیستوگرام تصویر ورودی (به جای استفاده از فاصله‌ی اقلیدسی معمولی در (۱))، مطابق رابطه‌ی (۴) فاصله‌ی وزن‌دار مناسبی با توجه به این که $\|M\|^2 = \text{trace}(M^T \times M)$ ارائه شده است:

$$H_o = \arg \min_H J(H) \quad (4)$$

$$\text{where } J(H) = \text{trace}((H - H_i)^T W (H - H_i)) + \lambda (\text{trace}((H - U)^T (H - U)))$$

در رابطه‌ی (۴)، W ماتریس وزن‌دهی و نیز $\text{trace}(X)$ بیان‌گر مجموع درایه‌های قطر اصلی ماتریس مربعی X است؛ هیستوگرام

نزدیک کردن هیستوگرام مطلوب به هیستوگرام تصویر ورودی و توزیع یکنواخت و نیز نرم کردن هیستوگرام مطلوب در این رابطه گنجانده شده‌اند:

$$H_o = \arg \min_H \alpha \|H - H_i\|^2 + \beta \|H - U\|^2 + \gamma \|\nabla H\|^2 \quad (1)$$

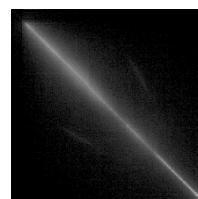
در رابطه‌ی فوق H, H_i, U و H_o به ترتیب هیستوگرام دو‌بعدی اصلاح‌شده، هیستوگرام دو‌بعدی تصویر ورودی، توزیع یکنواخت دو‌بعدی و هیستوگرام اصلاح‌شده خروجی را نشان می‌دهند؛ ∇ نیز عملگر مشتق است؛ α, β و γ نیز پارامترهای تنظیم یا موازنه تأثیر هر یک از جمله‌های رابطه‌ی (۱) هستند. طبق [۲۰] جواب مسأله‌ی بهینه‌سازی (۱) چنین است:

$$H_o = ((\alpha + \beta)I + \gamma DD^T)^{-1} (\alpha H_i + \beta U) \quad (2)$$

که D ماتریس یا عملگر مشتق‌گیر با اندازه ۲۵۶ در ۲۵۶ و به صورت زیر است:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}_{256 \times 256}$$

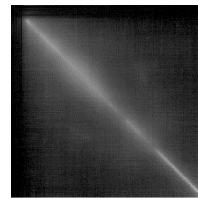
تعداد پارامترها و تنظیم آن‌ها از مشکلات روش فوق است. در روش پیشنهادی، ضمن کاستن از جملات رابطه‌ی (۱) و حذف پارامترهای موازنه، با احتساب اطلاعات محلی تصویر طی به‌کارگیری ماتریس وزنی مناسب در تعریف تابع هزینه، سعی در پیشبرد روند تکاملی از HE به [۱۸] و [۱۹] و به [۲۰] شده است.



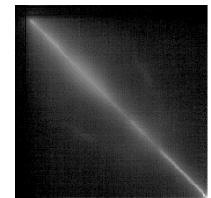
ب



الف



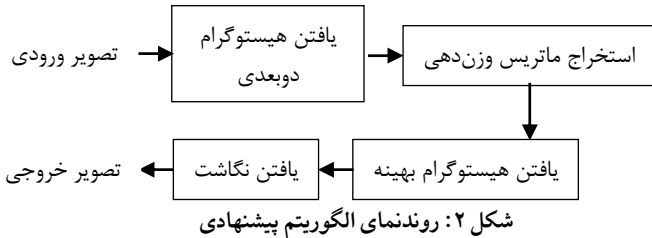
د



ج

شکل ۱: نمونه‌ای از هیستوگرام دو‌بعدی. الف- تصویر Plane و هیستوگرام دو‌بعدی آن با اندازه‌ی پنجره همسایگی D برابر با ب-۳، ج-۳ و د-۷.

تصویر خروجی را نشان می‌دهند. L ، m و m' به ترتیب بیان‌گر تعداد سطوح خاکستری تصویر ورودی، سطح خاکستری تصویر ورودی و سطح خاکستری متناظر در تصویر خروجی هستند. اثبات رابطه‌ی (۶) در بند دوم پیوست آورده شده است. روندنمای الگوریتم پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است:



طبق روندنمای فوق، الگوریتم پیشنهادی به صورت گام به گام چنین است:

- گام ۱: استخراج هیستوگرام دوبعدی H_i از تصویر ورودی؛
- گام ۲: به دست آوردن ماتریس وزن‌دهی W از روی H_i
- گام ۳: پیدا کردن هیستوگرام دوبعدی بهینه‌ی H_0 مبتنی بر رابطه‌ی (۵)؛
- گام ۴: پیدا کردن تابع نگاشت سطوح خاکستری از تصویر ورودی به تصویر خروجی با استفاده از رابطه‌ی (۶).

در روش پیشنهادی در این مقاله، کمینه شدن $J(H)$ از یک سو با نزدیک نگهداشتن H به تابع توزیع یکنواخت به گسترش بازه دینامیکی و افزایش انترپوی در تصویر حاصل منجر می‌شود و بدین ترتیب از کشیدگی یک‌سویه‌ی هیستوگرام به سمت نواحی تاریک‌تر یا روشن‌تر جلوگیری می‌کند. از سویی دیگر مبتنی بر جمله نخست $J(H)$ ، کمینه شدن $J(H)$ مانع دور شدن هیستوگرام مطلوب از هیستوگرام تصویر اصلی می‌شود، بدین سان روشنایی عمومی تصویر چندان به هم نمی‌خورد و با وزن‌دهی وقتی در جمله نخست $J(H)$ از بروز اثرات نامطلوب دیداری (شکل ۳-ب) که در روش HE وجود دارد، جلوگیری می‌کند.

۴ ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

ارزیابی الگوریتم بهبود کنتراست کار ساده‌ای نیست و معمولاً ارزیابی کیفی در کنار ارزیابی کمی، به طور هم‌زمان برای نتیجه‌گیری، انجام می‌شود. پس از پیاده‌سازی روش HE [۱۶] و روش 2DHE [۱۸ و ۱۹]، کارایی روش پیشنهادی با هر یک از این روش‌های پیاده‌سازی شده مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی‌های کمی و کیفی، کارایی بهتر روش پیشنهادی را نسبت به روش‌های مرجع نشان می‌دهد.

- پایگاه داده: در این مقاله از پایگاه‌های داده [۲۱ و ۲۲] استفاده شده است. پایگاه [۲۱] شامل ۲۴ تصویر رنگی به اندازه ۷۶۸ در ۵۱۲ یا ۵۱۲ در ۷۶۸ است و پایگاه [۲۲] نیز شامل ۴۴ تصویر خاکستری/رنگی با اندازه ۲۵۶ در ۲۵۶ است.

دوبعدی مطلوب H_0 نیز با کمینه کردن تابع هزینه‌ی $J(H)$ به دست می‌آید. روشن است که فاصله‌ی اقلیدسی H از H_i در رابطه (۱) یعنی $\|H - H_i\|^2 = \text{trace}((H - H_i)^T (H - H_i))$ ، حالت خاصی از فاصله‌ی وزن‌دار $\text{trace}((H - H_i)^T W (H - H_i))$ با $W=I$ است.

به طور کلی نقاط قله در هیستوگرام یک‌بعدی در تصویر، از نواحی هموار یا تعداد زیاد وقوع سطوح خاکستری نزدیک به هم به وجود می‌آید و مقادیر این سطوح خاکستری پس از افزایش کنتراست از هم فاصله می‌گیرند و این دور شدن و تمایز سطوح خاکستری (که پیش از این اندازه‌ای نزدیک به هم داشتند) اثراتی شبیه به نویز را سبب می‌شود. در نتیجه در این سطوح نیاز به ضریبی است که به تضعیف مقدار تابع $f(H - H_i)$ بیانجامد. طی بررسی و آزمایش معیارهای گوناگون، معکوس واریانس محلی H_i در همسایگی‌ای به اندازه k ، به عنوان ضریب یا وزنی که به $H - H_i$ اعمال شود انتخاب شد.

ماتریس وزن W یک ماتریس قطری است و همان‌طور که گفته شد درایه‌های آن معکوس واریانس محلی H_i در همسایگی $(H_i)_k$ را نشان می‌دهد. اندازه‌ی این همسایگی نیز همان مقداری است که در ساخت هیستوگرام دوبعدی، در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن هیستوگرام دوبعدی بهینه، از $J(H)$ نسبت به H مشتق گرفته و حاصل برابر صفر قرار داده شده است. جزئیات بیشتر این کار در بند نخست پیوست آورده شده است. در پایان هیستوگرام دوبعدی مطلوب H_0 از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید:

$$H_0 = (W + \lambda I)^{-1} (W H_i + \lambda U) \quad (5)$$

W ماتریس وزن‌دهی است و H ، H_i ، U و H_0 ذیل رابطه‌ی (۳) معرفی شده‌اند. λ نیز پارامتری برای تنظیم سطح کنتراست است که بنابر آزمایش‌های تجربی بر روی تصاویر گوناگون، مناسب‌ترین مقدار آن $\lambda = 1$ است.

برای ایجاد تصویر خروجی، باید نگاشتی از سطوح خاکستری تصویر ورودی به سطوح خاکستری تصویر خروجی داشته باشیم که با استفاده از تابع توزیع تجمعی دوبعدی از رابطه‌ی

$$P_x(m) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n H_x(i, j) \quad \text{به دست می‌آید.}$$

مطابق با [۱۹]، در این مقاله نیز سطح خاکستری تصویر ورودی m ، با استفاده از رابطه‌ی (۶) به سطح خاکستری m' در تصویر خروجی منتقل می‌شود:

$$m' = \arg \min_{l \in \{1, 2, \dots, L\}} |P_i(m) - P_o(l)| \quad (6)$$

که در آن P_i تابع توزیع تجمعی هیستوگرام دوبعدی تصویر ورودی و P_o تابع توزیع تجمعی هیستوگرام دوبعدی مطلوب

۴-۱ ارزیابی کیفی

نتیجه‌ی اعمال روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های [۱۶] و [۱۹]، بر روی تصاویر سطح خاکستری و نیز تصاویر رنگی، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ و شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج اعمال روش پیشنهادی در شکل‌های ۳ (د)، ۴ (د)، ۵ (د) و ۶ (ز) نشان می‌دهد که تصاویر بهبودیافته، کیفیت دیداری بالایی دارند؛ چنان‌که کنتراست تصویر به خوبی بهبودیافته و در عین حال روشنایی عمومی تصویر نیز حفظ شده است.

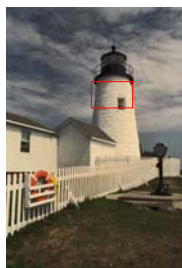
همان‌طور که در شکل ۳ (ب) مشاهده می‌کنید، اگرچه در روش HE گستره‌ی دینامیکی تصاویر به خوبی گسترده و باز شده ولی در نواحی هموار تصویر به بروز اثرات نامطلوب منجر می‌شود؛ در شکل ۴ (ب) نیز روشنایی و تیرگی بیش از اندازه سبب غیرطبیعی شدن تصویر شده است. هم‌چنین در تصاویر رنگی شکل ۵ (ب) و شکل ۶ (ب) نیز گسترش بازه دینامیکی باعث حذف جزئیات شد.



ب



الف



د



ج

شکل ۵: نتایج بهبود کنتراست برای تصویر Tower [۲۱] (تصویر رنگی). الف- تصویر اصلی، و در ادامه تصویر بهبودیافته به روش ب- HE [۱۶]، ج- 2DHE [۱۹] د- الگوریتم پیشنهادی.



ب



الف



د



ج



و



ه



ز

شکل ۶: نتایج بهبود کنتراست برای تصویر Island [۲۱] (تصویر رنگی). الف- تصویر اصلی، و در ادامه تصویر بهبودیافته به روش ب- HE [۱۶] (ج) FHSABP [۱۷] (د) HMF [۱۸] (ه) CEBGA [۱۵]، و- 2DHE [۱۹] ز- الگوریتم پیشنهادی.

روش 2DHE آثار مخرب روش HE را تا حدود زیادی برطرف کرده است؛ ولی هم‌چنان آثار نامطلوب در نواحی هموار مانند شکل ۳ (ج) و حذف جزئیات در کادر قرمز شکل ۵ (ج) وجود دارد.



ب



الف



د



ج

شکل ۳: نتایج بهبود کنتراست برای تصویر Plane [۲۱] (تصویر سطح خاکستری). الف- تصویر اصلی، و در ادامه تصویر بهبودیافته به روش ب- HE [۱۶]، ج- 2DHE [۱۹] د- الگوریتم پیشنهادی.



ب



الف

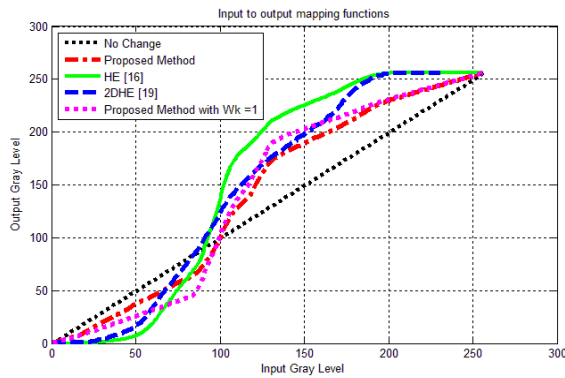


د

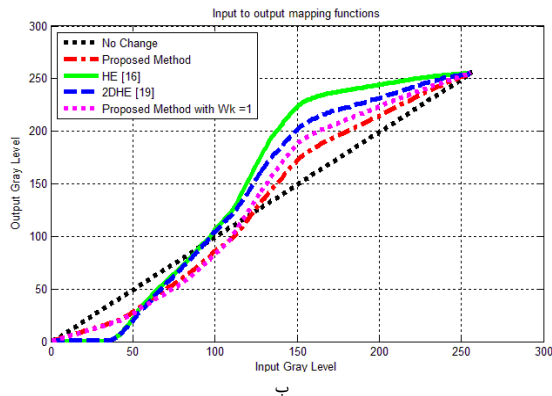


ج

شکل ۴: نتایج بهبود کنتراست برای تصویر Girl [۲۱] (تصویر سطح خاکستری). الف- تصویر اصلی، و در ادامه تصویر بهبودیافته به روش ب- HE [۱۶]، ج- 2DHE [۱۹] د- الگوریتم پیشنهادی.



الف



ب

شکل ۸: نگاشت سطوح خاکستری از تصویر ورودی به تصویر خروجی حاصل از اعمال الگوریتم‌های گوناگون متناظر با الف- شکل ۵ و ب- شکل ۶.

۴-۲ ارزیابی کمی

عملکرد مقاله‌ی ارایه شده مشابه [۱۸] و [۱۹] بر اساس دو معیار اندازه‌گیری آنتروپی گسسته‌ی نرمالیزه^۱ یعنی DE_N و نیز خطای مطلق میانگین روشنایی نرمالیزه^{۱۱} یعنی $AMBE_N$ با روش‌های HE [۱۶]، 2DHE [۱۹] و WHE [۱۸] مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این بخش، افزون بر تصاویر پیشین، تصاویر دیگری از پایگاه داده‌ی تصویر [۲۱] نیز بررسی و نتیجه ارزیابی در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

خطای مطلق میانگین روشنایی نرمالیزه $AMBE_N$ ، تفاضل میانگین روشنایی را در تصویر ورودی و خروجی در رابطه‌ی (۷) به‌کار می‌گیرد و عددی در بازه‌ی صفر و یک برمی‌گرداند.

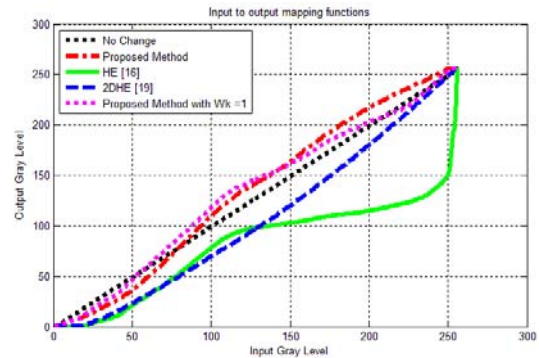
$$AMBE_N = \frac{1}{1 + |MB(X) - MB(Y)|} \quad (۷)$$

که در آن $MB(X)$ و $MB(Y)$ به‌ترتیب میانگین سطح خاکستری تصویر ورودی X و میانگین سطح خاکستری تصویر خروجی Y را نشان می‌دهند.

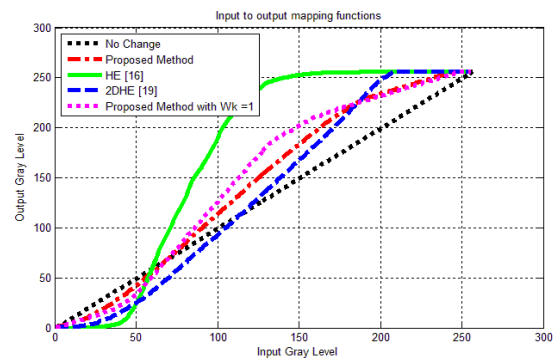
روشن است که هرچه مقدار $AMBE_N$ بیشتر باشد، روشنایی عمومی تصویر پس از نگاشت بیشتر محفوظ مانده است. مقادیر

هم‌چنین چمن در شکل ۵ (ج) به‌علت تیرگی زیاد، کاملاً غیرطبیعی به‌نظر می‌رسد. در ادامه، نتایج مقایسه‌های کیفی الگوریتم‌های گوناگون بهبود کنتراست برای تصویر رنگی Island در شکل (۶) نشان داده شده است.

تابع نگاشت سطح خاکستری از تصویر ورودی به تصویر خروجی (در تصویر رنگی تنها بر روی مؤلفه‌ی روشنایی) به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های فوق، برای تصویرهای سطح خاکستری و نیز رنگی، به‌ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۷: نگاشت سطوح خاکستری از تصویر ورودی به تصویر خروجی حاصل از اعمال الگوریتم‌های گوناگون متناظر با الف- شکل ۳ و ب- شکل ۴

از شکل‌های ۷ و ۸ پیدا است که برخلاف روش HE [۱۶]، نگاشت حاصل از روش 2DHE [۱۹] و نیز روش ارائه‌شده در این مقاله، مقادیری نزدیک به نگاشت همانی (بدون تغییر) در تصویر دارند و با همین نگاشت مناسب، کنتراست سراسری تصویر را افزایش می‌دهند و روش ارایه شده کارایی بهتری را نسبت به روش 2DHE [۱۹] نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی نمودار متناظر با $w_k = 1$ (یا همان $W = I$) و نمودار متناظر با 2DHE [۱۹]، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که با حذف جمله‌ی هموارساز از تابع هزینه 2DHE [۱۹]، چیزی از دست نمی‌رود.

مقادیر DE_N در جدول (۲) نیز عمل کرد بهتر راهکار ارایه شده را نسبت به روش های دیگر بیان می کند؛ مگر در شکل ۳ (هوایما) که نتایج ارزیابی کیفی بهبود مناسبتر کنتراست را در آن نسبت به روش های دیگر به ویژه در نواحی هموار نشان می دهد.

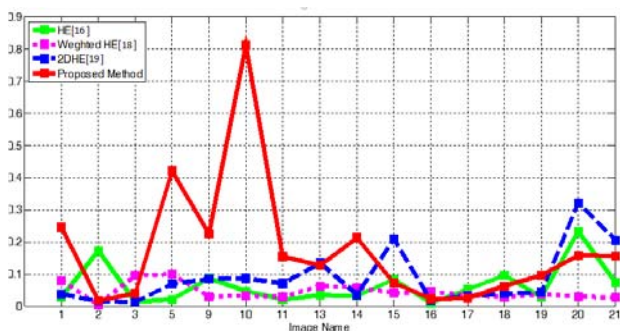
در ادامه مقایسه کمی، مقدار معیارهای کمی $AMBE_N$ و DE_N به دست آمده از اعمال روش های گوناگون بر تصویر رنگی Island در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: مقایسه کمی روش های گوناگون برای تصویر Island

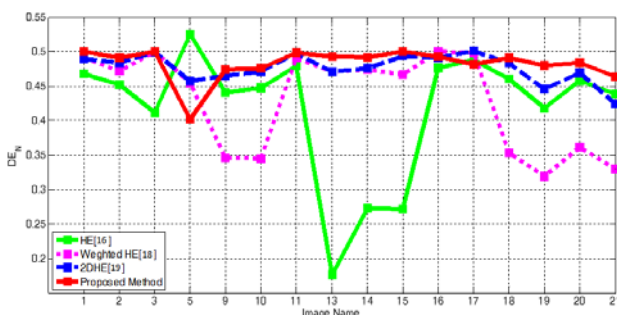
		$AMBE_N$	DE_N
Methods	HE [16]	0.2495	0.4532
	FHSABP [17]	0.5625	0.4517
	HMF [18]	0.0932	0.4843
	CEBGA [15]	0.1524	0.3787
	2DHE [19]	0.1873	0.4670
	Proposed Method	0.8125	0.4780

کارایی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش های دیگر با وجود کم بودن معیار DE_N نسبت به روش HMF [۱۸] از شکل (۶) و نیز جدول (۳) پیدا است.

در آزمایشی دیگر، معیار $AMBE_N$ و DE_N در شانزده نمونه تصویر مبتنی بر سه روش HE، 2DHE و Weighted HE به دست آمده و به ترتیب در شکل های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۹: نمودار مقایسه ای روش های گوناگون بر حسب معیار $AMBE_N$ برای شانزده نمونه تصویر



شکل ۱۰: نمودار مقایسه ای روش های گوناگون بر حسب معیار DE_N برای شانزده نمونه تصویر

$AMBE_N$ در جدول (۱) نشان می دهد که در همه تصاویر آزمون، الگوریتم ارایه شده توانسته است روشنایی عمومی تصویر را بهتر از سه روش دیگر حفظ کند. این واقعیت (حفظ میانگین روشنایی) در ارزیابی کیفی نیز نسبت به روش های دیگر به روشنی دیده می شود.

آنتروپی گسسته نرمالیزه DE_N نیز عددی بین ۰ و ۱ است که از رابطه (۸) به دست می آید:

$$DE_N = \frac{1}{1 + \frac{\log(256) - DE(Y)}{\log(256) - DE(X)}} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، $DE(X)$ و $DE(Y)$ به ترتیب آنتروپی گسسته تصویر ورودی و تصویر خروجی را نشان می دهد. اندازه بزرگتر DE_N تصویر حاصل از یک نگاهت، بیانگر تقویت بیشتر جزئیات تصویر پس از اعمال آن نگاهت است.

همچنین آنتروپی تصویر X از رابطه (۹) به دست می آید:

$$DE(X) = -\sum_{k=1}^K p(x_k) \log(x_k) \quad (۹)$$

از این رو است که برای ارزیابی درست، باید به بررسی همزمان معیارهای کیفی و کمی پرداخت.

جدول ۱: نتایج ارزیابی کمی روش های گوناگون مبتنی بر معیار $AMBE_N$

		Contrast Enhancement Methods			
		HE [16]	Weighted HE [18]	2DHE [19]	Proposed Method
Input Image [21]	Plane	0.0207	0.1002	0.0689	0.4215
	House	0.0290	0.0803	0.0377	0.2457
	Girl	0.0215	0.0280	0.0706	0.1705
	Hats	0.0870	0.0297	0.0853	0.2246
	Island	0.0466	0.0318	0.0866	0.8125
	Tower	0.0363	0.0363	0.0522	0.0698

جدول ۲: نتایج ارزیابی کمی روش های گوناگون مبتنی بر معیار DE_N

		Contrast Enhancement Methods			
		HE [16]	Weighted HE [18]	2DHE [19]	Proposed Method
Input Image [21]	Plane	0.5255	0.4550	0.4572	0.3822
	House	0.4676	0.4914	0.4898	0.4998
	Girl	0.3870	0.4903	0.4976	0.4982
	Hats	0.4406	0.3461	0.4652	0.4743
	Island	0.447	0.3448	0.4706	0.4759
	Tower	0.4645	0.4645	0.4930	0.4780

بهبود وفقی کنتراست با استفاده از متعادل‌سازی بهینه‌ی هیستوگرام دوبعدی

قدرت نویز و معیارهای کمی بهبود کنتراست رابطه‌ی معنادار دقیقی آشکار نیست.

طبق شکل (۱۴)، اگرچه کنتراست تصویر حاصل از جنبه دیداری مناسب‌تر از تصویر نویزی اولیه است ولی در راستای کاهش نویز بهبودی دیده نمی‌شود.



الف



ب



ج



د



ه



ز



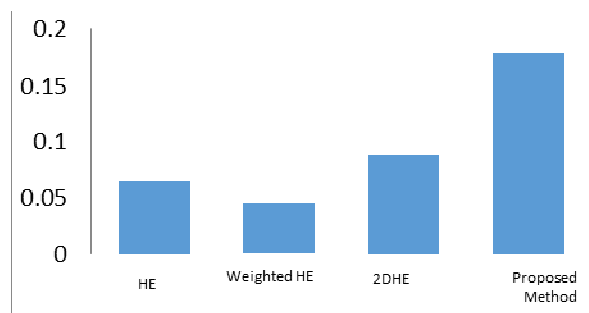
و

شکل ۱۴: الف- تصویر اصلی و در ادامه تصویر با افزودن نویز گاوسی با میانگین صفر و واریانس ب- ۰/۰۱، د- ۰/۰۳، و- ۰/۰۵ و نیز تصویرهای بهبود داده شده متناظر با آنها به ترتیب در ج، ه، ز.

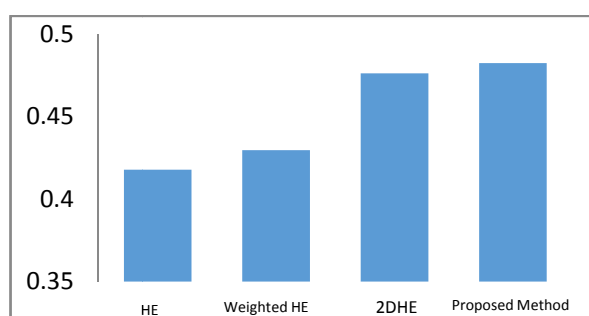
۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی وفقی برای بهبود کنتراست بر اساس اصلاح هیستوگرام دوبعدی و تعریف تابع هزینه‌ای مناسب ارائه شده است که تفاضل وزنداری از هیستوگرام مطلوب با هیستوگرام اصلی تصویر را شامل می‌شود.

هم‌چنین نمودار میانگین داده‌های معیار $AMBE_N$ و معیار DE_N برای شانزده نمونه تصویر مورد بررسی به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) برتری روش پیشنهادی ما را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: نمودار میانگین معیار $AMBE_N$ برای شانزده نمونه تصویر در روش‌های گوناگون

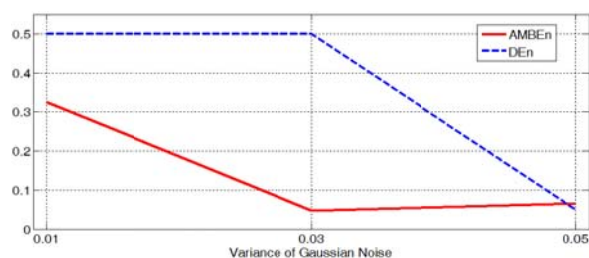


شکل ۱۲: نمودار میانگین معیار DE_N برای شانزده نمونه تصویر در روش‌های گوناگون

۳-۴ بررسی مقاوم بودن الگوریتم در برابر نویز

اگرچه برطرف کردن خرابی‌های ناشی از نویز هدف این مقاله نبوده و در فرمول‌بندی ریاضی مساله نیز بدان توجه نشده است ولی برای بررسی مقاوم بودن الگوریتم پیشنهادی در برابر نویز آزمایش دیگری انجام شده است.

در این آزمایش، تصویر اصلی با نویز گاوسی (با واریانس‌های گوناگون) آمیخته شده و نتیجه حاصل از الگوریتم پیشنهادی نیز به صورت کمی و کیفی به ترتیب در شکل (۱۳) و شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار اندازه معیارهای کمی $AMBE_N$ و DE_N در تصویر بهبودیافته در حضور نویز گاوسی با میانگین صفر بر حسب واریانس گوناگون نویز

همان‌گونه که از شکل (۱۳) دیده می‌شود با افزایش قدرت نویز، معیارهای کمی افت محسوسی داشته‌اند ولی به هر حال، بین

مراجع

- [1] Chengand H. D., Xu H. J., "A novel fuzzy logic approach to contrast enhancement", *Pattern Recognition*, vol.33, no.5, pp. 809–819, May. 2000.
- [2] Beghdadi A. and Négrate A. L., "Contrast enhancement technique based on local detection of edges", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 46, no. 2, pp. 162–174, May. 1989.
- [3] Polesel A., Ramponi G. and Mathews V., "Image enhancement via adaptive unsharp masking", *IEEE Trans. Image Process.* vol. 9, no. 3, pp. 505–510, Mar. 2000.
- [4] Sherrier R and Johnson G., "Regionally adaptive histogram equalization of the chest", *IEEE Trans. Medical Imaging* vol. 6, no. 1, pp. 1–7, Mar. 1987.
- [5] Oppenheim, A.S. and Stockham R., "Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals". *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 16, no.3, pp. 437–466, Sep. 1968.
- [6] Agaian S., Panetta K., and Grigoryan A., "Transform-based image enhancement algorithms with performance measure", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 367–382, Mar. 2001.
- [7] Agaian S., Silver B., and Panetta K., "Transform coefficient histogram based image enhancement algorithms using contrast entropy," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 3, pp. 741–758, Mar. 2007.
- [8] Aghagolzadeh S. and Ersoy C., "Transform image enhancement," *Opt. Eng.* vol. 31, no. 3, pp. 614–626, 1992.
- [9] Greenspan H., Anderson C., and Akber S., "Image enhancement by nonlinear extrapolation in frequency space," *IEEE Transactions on Image Processing*. vol. 9, no. 6, pp. 1035–1048, Jun. 2000.
- [10] Tang J., Peli E., and Acton S., "Image enhancement using a contrast measure in the compressed domain," *IEEE Signal Processing Letters*. vol. 10, no. 10, pp. 289–292, Oct. 2003.
- [11] Kim Y. T., "Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization," *IEEE Trans. Consum. Electron.* vol. 43, no. 1, pp. 1–8, Feb. 1997
- [12] Wang Y., Chen Q., and Zhang B., "Image enhancement based on equalarea dualistic sub-image histogram equalization method," *IEEE Trans Consum. Electron.* vol. 45, no. 1, pp. 68–75, Feb. 1999.
- [13] Chen Z. Y., Abidi B. R., Page D. L., and Abidi M. A., "Gray-level grouping (GLG): "An automatic method for optimized image contrast enhancement—Part II: The variations," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 15, no. 8, pp. 2303–2314, Aug. 2006.

نتایج و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تصویر بهبودیافته ظاهری مطلوب و طبیعی دارد و الگوریتم پیشنهادی از یک سو روشنایی عمومی تصویر را حفظ می‌کند و از سوی دیگر عمل‌کرد بسیار خوبی در نواحی هموار و نواحی‌ای شامل جزئیات تصویر دارد. انجام آزمایش بر روی شانزده تصویر آزمون، نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش مرجع 2DHE [۱۹] به صورت میانگین به بهبود ۷۵ درصدی و ۳ درصدی معیارهای عیار DE_N و $AMBE_N$ منجر شده است.

پیوست

۱- برای اثبات رابطه‌ی (۵)، ابتدا رابطه‌ی (۴) به عوامل ضرب گسترش و گسترش یافته آن، برابر $J(H)$ قرار داده شده است:

$$\begin{aligned} H_o &= \arg \min_H \text{trace} ((H - H_i)^T W (H - H_i)) \\ &\quad + \lambda (\text{trace} ((H - U)^T (H - U))) \\ &= \arg \min_H \text{trace} (H^T W H - H^T W H_i - H_i^T W + H_i^T W H_i) \\ &\quad + \lambda \text{trace} (H^T H - U^T H - H^T U + U^T U) \\ &= \arg \min_H (J(H)) \end{aligned}$$

سپس برای حل رابطه‌ی بهینه‌سازی مطرح شده از $J(H)$ مشتق گرفته و حاصل برابر صفر قرار داده شده است (با استفاده از روابط

$$\text{مشتق} \quad \frac{\partial}{\partial X} \text{Tr}(X^T B^T) = \frac{\partial}{\partial X} \text{Tr}(XB) = \frac{\partial}{\partial X} \text{Tr}(BX) = B^T \quad \text{و} \quad \frac{\partial}{\partial X} \text{Tr}(X^T BX) = BX + B^T X \quad \text{و} \quad \frac{\partial}{\partial X} \text{Tr}(X^T X) = 2X$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(H)}{\partial X} &= (WH + W^T H - WH_i - W^T H_i + 0) \\ &\quad + \lambda(2H - U - U) \end{aligned}$$

از آن‌جا که ماتریس وزن W ماتریسی قطری است، رابطه‌ی

$$W^T = W \quad \text{برقرار خواهد بود و در پایان رابطه زیر اثبات می‌گردد:}$$

$$H_o = (W + \lambda I)^{-1} (W H_i + \lambda U)$$

۲- اثبات رابطه‌ی (۶):

فرض کنید که تصویر ورودی $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ با تابع توزیع تجمعی $P_i(m)$ و هیستوگرام نرمالیزه شده‌ی h_i به تصویر $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_K\}$ با تابع توزیع $P_o(m)$ و هیستوگرام نرمالیزه شده‌ی h_o نگاشت یابد. روشن است که تصویر حاصل از تبدیل $z_m = P_i(m)$ یا $z_m = P_o(m)$ دارای هیستوگرام یکنواخت است، پس:

$$y_m = P_o^{-1}(P_i(x_m))$$

به بیان دیگر: $P_i(x_m) = P_o(y_m)$. روشن است که به دلیل گسسته بودن سطوح خاکستری برابری اخیر لزوماً اتفاق نخواهد افتاد، از این رو سطح خاکستری x_m از تصویر ورودی به سطح خاکستری y_m در تصویر خروجی به گونه نگاشت می‌یابد که:

$$y_m = \arg \min_{l \in \{1, 2, \dots, L\}} |P_i(x_m) - P_o(l)|$$



سحر ابروانی: مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق-الکترونیک به ترتیب از دانشگاه تبریز و دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل دریافت کرد. ایشان هم‌اکنون به عنوان پژوهشگر در دانشگاه SUTD (Singapore University of Technology and Design) مشغول به کار است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل الگوریتم‌های پردازش تصویر و یادگیری ماشین برای کاربردهای عملی است.



مهدی ازوجی: مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه صنعتی شریف و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۹ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر در رشته مهندسی برق-الکترونیک دریافت کرد. زمینه‌های مورد علاقه ایشان شامل بینایی ماشین، بازشناسی آماری/ساختاری الگو و نیز یادگیری منیفولد است.

- [14] Wang Q. and Ward R. K., "Fast image/video contrast enhancement based on weighted thresholded histogram equalization," *IEEE Trans. Consum. Electron.* vol. 53, no. 2, pp. 757–764, May. 2007.
- [15] Hashemi S., Kiani S., Noroozi N., Ebrahimi M., "An image contrast enhancement method based on genetic algorithm", *Pattern Recognition. Lett.* vol. 31, pp. 1816–1824, Oct. 2010.
- [16] Gonzalez R. C. and Woods R. E., "Digital Image Processing", 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [17] Wang, C., Peng J., and Ye Z. "Flattest histogram specification with accurate brightness preservation". *IET, Image Processing*, vol. 2 no. 5, pp. 249–262, Oct. 2008.
- [18] Arici T., Dikbas S. and Altunbasak Y. "A Histogram Modification Framework and Its Application for Image Contrast Enhancement", *IEEE Transactions. Image Processing.* vol.18, no. 9, pp. 1921–1935, Sep. 2009.
- [19] Celik T., "Two-dimensional histogram equalization and contrast enhancement", *Pattern Recognition.*, vol. 45, no. 10, pp. 3810–3824, Apr. 2012.
- [20] Celik T. and Tjahjadjadi T., "Contextual and Variational Contrast Enhancement", *IEEE Transactions. Image Processing.*, vol. 20, no. 12, pp. 3431–3441, Dec. 2011
- [21] Eastman Kodak Company, Kodak Lossless True Color Image Suite, <http://r0k.us/graphics/kodak/>, Dec. 2013.
- [22] USC-SIPI image database–Volume III, University of Southern California, <http://sipi.usc.edu/database/S/>, Dec. 2013.

^۱ Histogram Equalization

^۲ Bi-Histogram Equalization

^۳ Dualistic Sub-image Histogram Equalization

^۴ Convex Optimization

^۵ Flattest Histogram Specification with Accurate Brightness

^۶ Cost Function

^۷ Contrast Enhancement Using Genetic Algorithm

^۸ Two-dimensional Histogram Equalization

^۹ Contextual and Variational Histogram Equalization

^{۱۰} Normalized Discrete Entropy

^{۱۱} Absolute Mean Brightness Error

جدول کوتاه‌نوشته‌ها

جدول کوتاه‌نوشته‌ها	
HE	Histogram Equalization
2DHE	Two-dimensional Histogram Equalization
CVCE	Contextual and Variational Histogram Equalization
DE _N	Normalized Discrete Entropy
AMBE _N	Absolute Mean Brightness Error
H _i	Input Histogram
H _o	Output Histogram
U	Uniform Distribution
H	2-D Histogram