

# طراحی الگوریتم: پیشرفتهای روشمند

حسین رادمرد

۹ اردیبهشت ۱۴۰۳

## ۱.۰ مسئله ۸۳ رنگ کردن یک گراف دو رنگی

در این مسئله، مانند موارد بعدی، حل مسئله هدف ماست و بهینه بودن جواب برای ما حائز اهمیت نیست. در اینجا، ما الگوریتمی را برای رنگ کردن گراف با در دست داشتن تنها دو رنگ، بررسی میکنیم. نسخه‌ی کلی‌تر (رنگ آمیزی با هر تعداد رنگ) در مسئله‌ی ۵۹، صفحه‌ی ۲۳۶ بررسی میشود. گرچه، نسخه‌ی فعلی بسیار بهینه‌تر است. در ادامه، این بحث بسیار به موضوع "گرافهای پرکاربرد: گرافهای دوبخشی" مرتبط است.

گراف همبند بدون جهت  $N_v = G$  (ناهایی) به ما داده شده‌ست. ما قصد داریم با رنگ‌های سیاه و سفید گراف را رنگ آمیزی کنیم به گونه‌ای که هیچ دو راس همسایه‌ای دارای رنگ یکسانی نباشند. چنین گرافی را گراف دورنگی مینامیم. الگوریتم حریصانه‌ای که ما قصد ساخت آن را برای این منظور داریم به پیمایش سطری گراف ها مرتبط است که آن را در ابتدا بررسی کردیم.

چنین گرافی را گراف دورنگی مینامیم. الگوریتم حریصانه‌ای که ما قصد ساخت آن را برای این منظور داریم به پیمایش سطری گراف ها مرتبط است که آن را در ابتدا بررسی کردیم.

### پیمایش سطری گراف: یادآوری

#### معرفی

اول از همه، اجازه دهید مفاهیم "فاصله‌ی میان دو راس" و "پیمایش سطری" را برای گراف‌های همبند بدون جهت تعریف کنیم.

تعریف ۱۰ (فاصله‌ی میان دو راس): در نظر میگیریم،  $(N_v = G)$  یک گراف همبند بدون جهت  $s$  و  $s'$  دو راس این گراف باشند. طول کوتاه‌ترین مسیر میان  $s$  و  $s'$  را فاصله‌ی میان  $s$  و  $s'$  گویند.

تعریف ۱۱ (جستجوی سطری): فرض کنیم  $G$  یک گراف همبند و بدون جهت  $s$  یکی از راس‌های آن باشد. هر فرایندی که با افزایش فاصله‌ها از راس  $s$  با راس‌های گراف  $G$  برخورد میکند به عنوان پیمایش سطری گراف  $G$  از  $s$  شناخته میشود.

از نمودار (b) در شکل ۸.۷ صفحه‌ی ۳۶۳، میتوانیم نتیجه بگیریم که لیست  $a, b, c, d, e, f, g, h$  با پیمایش سطری با شروع از راس  $a$  مطابقت دارد. و همین مطلب برای لیست  $a, b, c, d, e, f, h, g$  نیز صدق میکند.

تصویر ۸.۷ - یک مثال از گراف. تصویر (a) گرافی را نمایش میدهد که مثالی از حالت مسئله را نشان میدهد. تصویر (b) کوتاه‌ترین مسیر راس  $a$  را تا هر راس گراف با خطوط پررنگ نشان میدهد. در تصویر (b)، عددی که در هر راس مشخص است در واقع فاصله‌ی آن راس تا راس  $a$  است.

## حلقه بدون تغییر

ما علاقه داریم یک الگوریتم بدون تغییر بسازیم؛ یک الگوریتم حریصانه؛ و اینگونه خود را محدود میکنیم. برای جستجوی حلقه بدون تغییر، ادامه ی این ساز و کار به خواننده واگذار میشود. اکنون تصور میکنیم قسمتی از کار انجام شده ست (بخش ۳، صفحه ۹۳ را ببینید). به این ترتیب، برای یک گراف جزئی  $(N', = G' \cup V')$  (زیرگراف  $G$  القا شده با مجموعه رئوس  $N'$  شامل رئوس ابتدایی)، لیستی تشکیل شده از پیمایش سطری  $G'$  با شروع از  $s$  داریم. عموماً\* این لیست، CLOSE نامیده میشود. پیشرفت این روند شامل گستردن این لیست با افزودن رئوسی است که در CLOSE نیستند و تا جای ممکن به  $s$  نزدیکند.

از آنجایی که هر راسی که در CLOSE حضور نداشته باشد، یک کاندید احتمالی برای انتقال به CLOSE است، در غیاب بقیه ی مفروضات، پیشرفت ممکن اما به همان نسبت هزینه بر است. پیشنهاد میکنیم که نسخه اول این ثابت را با اضافه کردن یک ساختمان داده بهبود ببخشید. ساختمان داده OPEN شامل تمام رئوسی ست که در CLOSE حضور نداشته و کاندید این موضوع هستند که همسایه حداقل یکی از رئوس CLOSE هستند. بیشین\*، OPEN به عنوان یک لیست اولویت با مدیریت بر روی فاصله ی عناصرش از  $s$  بوجود می آید، این موضوع به این دلیل است که عنصری که باید به لیست CLOSE منتقل شود باید نزدیک ترین به  $s$  باشد.

بعدها میبینیم که نسخه ساده شده یک لیست اولویت نیز امکان پذیر است. برای ماندگاری این نسخه جدید از ثابت\*، بپینه است که سر OPEN را به انتهای لیست CLOSE منتقل کنیم، و - به عنوان همتای تقویت ثابت\*\* - برای معرفی همسایگان "جدید" عنصر منتقل شده به OPEN، عنصرهایی که نه در OPEN نه در CLOSE هستند (این یک انتخاب حریصانه است).

با این حال، با توجه به عنصری  $e$  در OPEN، پرسیدن مستقیم درباره وجود یا عدم وجود یکی از همسایگان آن در OPEN یا CLOSE می تواند پرهزینه باشد. راه حل بهتر شامل تقویت (جدید) با گزاره زیر است: از نظر رنگ آمیزی آینده، یک "رنگ" به هر راس گراف اختصاص می یابد، سفید اگر راس در OPEN یا CLOSE باشد، و در غیر این صورت خاکستری (در واقع، در اینجا، دو رنگ نقش مقادیر بولین را بازی می کنند). به شرطی که دسترسی مستقیم به رئوس امکان پذیر باشد، به روز رسانی OPEN آسان تر می شود. در پیشرفت، حفظ این مکمل ناوردا با رنگ آمیزی هر راسی که به OPEN منتقل می شود به رنگ سفید حاصل می شود.

بیا بید به استراتژی مدیریت صف OPEN بازگردیم. آیا می توان به جای صف اولویت دار از یک صف ساده FIFO (نگاه کنید به بخش ۸.۱، صفحه ۳۲) استفاده کرد؟ در این صورت، مدیریت OPEN به طور قابل توجهی ساده می شود. برای انجام این کار، زمانی که رأس  $e$  از OPEN خارج می شود تا به CLOSE ملحق شود، همسایگان  $e$  که نامزد ورود به OPEN هستند باید فاصله ای بیشتر یا مساوی با تمام عناصر موجود در OPEN داشته باشند، که این امر امکان داشتن یک صف مرتب را فراهم می کند. این بدان معناست که اگر  $e$  در فاصله  $k$  از  $s$  باشد، سایر عناصر OPEN در فاصله  $k$  یا  $k + 1$  از  $s$  قرار دارند، زیرا همسایگان "خاکستری"  $e$  در فاصله  $k + 1$  از  $s$  قرار دارند. این فرض را به ناوردا اضافه می کنیم. خواننده دعوت می شود بررسی کند که آیا این موضوع با راه اندازی حلقه واقعاً برقرار شده است. همچنان باید ثابت کرد که با پیشرفت حفظ می شود. در نهایت، ما ناوردا ی زیر را پیشنهاد می کنیم که از چهار بند تشکیل شده است.

۱. بسته (CLOSE) یک صف اول-وارد-اول-خارج (FIFO) است که محتوای آن نشان دهنده یک "پیمایش عمق-اول" از زیرگراف  $G$  است که توسط رئوس موجود در بسته (CLOSE) تشکیل شده است.

۲. باز (OPEN) یک صف اول-وارد-اول-خارج (FIFO) از رئوس همسایه رئوس موجود در بسته (CLOSE) است. اشتراک مجموعه بین باز (OPEN) و بسته (CLOSE) تهی است.

۳. اگر ابتدای صف باز (OPEN) حاوی رئوس با فاصله  $k$  از  $s$  باشد، سایر عناصر صف باز (OPEN) در فاصله  $k$  یا  $k + 1$  از  $s$  قرار دارند.

۴. در گراف  $G$ ، رئوس موجود در بسته (CLOSE) یا باز (OPEN) به رنگ سفید رنگ آمیزی می شوند، سایر رئوس خاکستری هستند.

شکل ۹.۷، صفحه ۳۶۶، مراحل مختلف «پیمایش پهنای-اول» گراف شکل ۸.۷، صفحه ۳۶۳ را نشان می‌دهد. در هر گراف شکل، رئوس موجود در بسته (CLOSE) با خطوط خاکستری و رئوس موجود در باز (OPEN) با خطوط دوتایی نمایش داده شده‌اند. فواصل فقط به عنوان یادآوری ذکر شده‌اند، الگوریتم از آنها استفاده نمی‌کند. بیابید به عنوان مثال در مورد مرحله‌ای که منجر به گذار از شکل (e) به شکل (f) می‌شود، توضیح دهیم. در شکل (e)، بسته (CLOSE) لیست «پیمایش پهنای-اول» زیرگراف القا شده توسط رئوس  $a, b, c, d$  را در خود جای داده است. راس  $e$ ، سر صف باز (OPEN) به انتهای بسته (CLOSE) منتقل خواهد شد. کدام همسایه‌های  $e$  قرار است به OPEN ملحق شوند؟  $c$  و  $b$  قبلاً در بسته (CLOSE) هستند، بنابراین موردی برای اضافه شدن ندارند.  $g$  قبلاً در باز (OPEN) است، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. تنها راس باقی‌مانده  $h$  است که به صف باز (OPEN) ملحق شده و به رنگ سفید رنگ‌آمیزی می‌شود.

### ساختارهای داده

از دو نوع ساختار داده در این الگوریتم استفاده می‌شود. مورد اول، صف‌های اول-وارد-اول-خارج (FIFO) در صفحه ۳۲ توضیح داده شده‌اند. مورد دوم مربوط به نسخه‌ی «رنگ‌آمیزی‌شده» گراف‌ها است. گراف بدون جهت رنگ‌آمیزی‌شده (Undirected Colored Graph) جهت رنگ‌آمیزی‌شده (Undirected Colored Graph) در این الگوریتم، نیاز به رنگ‌آمیزی رئوس‌های یک گراف، دسترسی به رنگ آن‌ها و کاوش لیست همسایگان وجود دارد، بنابراین تعاریف زیر ارائه می‌شود (فرض بر این است که مجموعه رنگ‌ها (Colors) تعریف شده است):

- عملگر رنگ‌آمیزی  $ColorGr(G, s, col)$ : عملیاتی که رأس  $s$  گراف  $G$  را با رنگ  $col$  رنگ‌آمیزی می‌کند.
- تابع رنگ‌رأس  $WhichColorGr(G, s)$  نتیجه نوع رنگ‌ها (Colors) تابعی که رنگ رأس  $s$  گراف  $G$  را برمی‌گرداند.
- عملگر همسایگان باز  $OpenNeighborsGr(G, s)$ : عملیاتی که کاوش لیست همسایگان رأس  $s$  گراف  $G$  را آغاز می‌کند.
- تابع پایان لیست همسایگان  $EndListNeighborsGr(G, s)$  نتیجه بولی (B) تابعی که مقدار درست (true) را برمی‌گرداند در صورتی که کاوش لیست همسایگان رأس  $s$  گراف  $G$  تمام شده باشد و در غیر اینصورت مقدار نادرست (false) را برمی‌گرداند.
- عملگر خواندن همسایگان  $ReadNeighborsGr(G, s)$ : عملیاتی که هویت رأس «زیر خواننده» لیست همسایگان  $s$  را در  $s'$  ذخیره کرده و سپس خواننده را یک موقعیت به جلو حرکت می‌دهد.

در این کاربرد، از نظر بیان الگوریتم و کارایی، بهترین بهینه‌سازی نمایش آن با استفاده از لیست همجوری است (برای مشاهده نمونه‌ای از چنین نمایشی برای گراف‌های جهت‌دار، به شکل (d) در صفحه‌ی ۲۳ مراجعه کنید). بنابراین، گراف به صورت یک «سه‌تایی»  $(G, N, V)$ ،  $(R)$  تعریف می‌شود که در آن  $R$  نشان‌دهنده رنگ‌ها است (در حال حاضر «سفید» و «خاکستری»).

### الگوریتم

علاوه بر نمودار  $G$ ، این الگوریتم از متغیرهای  $cv$  راس جاری و فهرست همسایگان برای مرور لیست همسایگان استفاده می‌کند.

1. constants
2.  $n$   $N1$  and  $n = \dots$  and  $N = 1 \dots n$  and Colors = grey, white and
3.  $V$   $N \times N$  and  $V = \dots$
4. variables
5.  $R$   $N$  Colors and  $G = (N, V, R)$  and
6.  $s$   $N$  and  $cv$   $N$  and  $neighb$   $N$  and CLOSE FIFO(N) and OPEN FIFO(N)
7. begin

شکل ۹.۷ - مراحل مختلف کاوش اولویت-عرضی در گراف اسکیم (الف) در شکل ۸.۷ (صفحه ۳۶۳).  
 رئوس با دایره توپر، رئوس CLOSE هستند، آنهایی که با دو دایره مشخص شده اند، رئوس OPEN هستند.  
 مقدار صحیح که هر راس را همراهی می کند، فاصله شناخته شده از راس  $a$  است. دو صف OPEN و CLOSE  
 به ترتیب در شمال شرقی و جنوب گراف ها نشان داده شده اند.

1. / coloring all the vertices in grey: /
2. for  $w$   $N$  do
3. ColorGr(G, w, grey)
4. end for;
5. InitFifo(CLOSE); InitFifo(OPEN);
6.  $s$   $\dots$  ; / choice of the initial vertex: /
7. ColorGr(G, s, white);
8. AddFifo(OPEN, s);
9. while not IsEmptyFifo(OPEN) do
10.  $cv$  HeadFifo(OPEN); RemoveFifo(OPEN);
11. AddFifo(CLOSE, cv);
12. OpenNeighborsGr(G, cv) ;
13. while not EndListNeighborsGr(G, cv) do
14. ReadNeighborsGr(G, cv, neighb) ;
15. if WhichColorGr(G, neighb) = grey then
16. ColorGr(G, neighb, white) ;
17. AddFifo(OPEN, neighb)
18. end if

- 19. end while
- 20. end while;
- 21. write(CLOSE)
- 22. end

سوال ۱: پیچیدگی مجانبی این الگوریتم از نظر شرایط ارزیابی شده چیست؟  
 سوال ۲: بر اساس این الگوریتم، اصل الگوریتم رنگ آمیزی حریصانه را توضیح دهید.

### الگوریتم رنگ آمیزی دو رنگ گراف

اکنون مجهز هستیم تا به مشکل اصلی در هسته این مسئله بپردازیم: رنگ آمیزی یک گراف با سیاه و سفید. ما الگوریتم بالا را به گونه ای تطبیق خواهیم داد که به صورت متناوب با سیاه و سفید، بر اساس عمق در رابطه با راس شروع، رنگ آمیزی شود، تا زمانی که رئوس ها تمام شوند یا یک عدم امکان کشف شود.

سوال ۳: الگوریتم رنگ آمیزی را طراحی کنید.

سوال ۴: بر اساس این الگوریتم، اصل الگوریتم رنگ آمیزی حریصانه را توضیح دهید.  
 شکل ۸.۷، صفحه ۳۶۳

سوال ۵: کد الگوریتم را بنویسید و پیچیدگی آن را مشخص کنید.

سوال ۶: مسئله ۵۹، صفحه ۲۳۶، به مسئله عمومی تر رنگ آمیزی با  $m$  رنگ  $m \geq 2$  می پردازد. امکان تعمیم الگوریتم ارائه شده در پاسخ به سوال ۵، برای  $m < 2$  را مورد بحث قرار دهید.

تذکر یک ویژگی جالب از گراف های دو-رنگ پذیر این است که: یک گراف دو-رنگ پذیر است اگر و تنها اگر هیچ دوره ی فرد طولی نداشته باشد. با این حال، این ویژگی سازنده نیست: مشاهده ی آن روی یک گراف منجر به رنگ آمیزی نمی شود!  
 راه حل در صفحه ۳۹۷ است.