

راهنمای ریاضیدانان در هدایت موفقیت‌آمیز دانشجویان کارشناسی در امر پژوهش*

مایکل دورف، الیسون هنریچ، و لارا پادول

مترجم: ستار ستاری

چکیده

پژوهش دوره کارشناسی در زمینه‌های مختلف ریاضی و در شرایط گوناگون انجام می‌شود اما همه استادان راهنمای دانشجویان کارشناسی ریاضی، با موضوعات مشترکی روبه‌رو می‌شوند. این مقاله، راهنمایی مختصر برای کمک به استادان در سطوح مختلف تجربه است تا دانشجویان را در پروژه‌های پژوهشی هدایت کنند. به‌طور خاص، موضوعات انتخاب مسائل پژوهشی مناسب، جذب دانشجویان، مشخص کردن انتظارات، پیش بردن پژوهش و کمک به دانشجویان برای انتشار کارشان را مطرح می‌کنیم.

پژوهش همراه با دانشجویان کارشناسی می‌تواند یکی از خشنودکننده‌ترین جنبه‌های شغل ما استادان ریاضی باشد. برای آنهایی که هم تدریس و هم پژوهش را دوست دارند، چه چیزی بهتر از راهنمایی دانشجویان و همکاری با ایشان؟ ما هر سه کاملاً معتقدیم که کار کردن با دانشجویان دوره کارشناسی در پژوهش، به‌طور باورنکردنی رضایت‌بخش است! جمعاً بیش از ۱۰۰ دانشجو را در پژوهش راهنمایی کرده‌ایم. تقریباً به همه این دانشجویان کمک کرده‌ایم تا درباره کارشان سخنرانی کنند یا پوستر ارائه دهند

عبارات و کلمات کلیدی. انتخاب مسائل؛ انتشار ریاضی؛ مدیریت پویایی گروه؛ پژوهش دوره کارشناسی.

*Michael Dorff, Allison Henrich and Lara Pudwell, Successfully mentoring undergraduates in research: A how to guide for mathematicians, *PRIMUS*, 27 (2017), no. 3, 320–336.

و همراه با بسیاری از این دانشجویان، مقاله چاپ کرده‌ایم. همچنین با شورای پژوهش دوره کارشناسی^۱ (CUR) در ارتباط هستیم که در پژوهش دوره کارشناسی در همه زمینه‌ها پیشرو است. علاوه بر این، مایکل به‌کمک مرکز پژوهش دوره کارشناسی در ریاضیات^۲ (CURM) در کارگاه‌های تابستانی آموزش استادان، به بیش از ۱۵۰ عضو هیئت علمی کمک کرده است تا بیش از ۱۰۰۰ دانشجوی کارشناسی را در پژوهش راهنمایی کنند.

بر پایه تجربیات خود، آموخته‌ایم که وقتی پژوهش دوره کارشناسی را شروع می‌کنید، چیزهای گوناگونی وجود دارند که باید مورد توجه قرار دهید؛ چه نخستین پروژه خود را با یک دانشجو شروع کرده باشید، چه تا به حال، فقط با دانشجویان تحصیلات تکمیلی یا همکاران خود، کار پژوهشی کرده باشید و چه تجربه قبلی در پژوهش دوره کارشناسی داشته باشید. برای کمک به شما به‌منظور آمادگی برای تجربه پژوهشی بعدی با دانشجویان، شش گام اساسی لازم برای راهنمایی موفق دانشجویان در پژوهش را شرح خواهیم داد. این شش گام اساسی عبارت‌اند از:

- (۱) انتخاب یک مسئله پژوهشی مناسب؛
- (۲) جذب و انتخاب دانشجویان برای راهنمایی؛
- (۳) مشخص کردن انتظارات و مدیریت پویایی گروه؛
- (۴) شروع پژوهش و به پیش بردن آن؛
- (۵) کمک به دانشجویان برای پرورش مهارت‌های ارتباطی؛
- (۶) تدارک برای آینده.

قبل از اینکه این شش گام اساسی را به‌طور مبسوط شرح دهیم، خوب است پژوهش دوره کارشناسی و موفقیت را تعریف کنیم. در CUR پژوهش دوره کارشناسی این‌طور تعریف می‌شود: «پژوهش یا بررسی انجام شده توسط یک دانشجوی کارشناسی که کمک فکری یا مبتکرانه اصیل به موضوع مورد پژوهش می‌کند.» [۶] نویسندگان این مقاله، متفق‌اند که پژوهش دوره کارشناسی شامل دانشجویانی است که روی مسائلی کار می‌کنند که هیچ‌کس قبلاً آنها را حل نکرده است اما برخی افراد پژوهش دوره کارشناسی را خیلی ساده به معنای کار کردن دانشجویان روی مسائلی در نظر می‌گیرند که خود این دانشجویان قبلاً هیچ‌وقت حل نکرده‌اند. یک دلیل برای اینکه ما تعریف CUR را ترجیح می‌دهیم، این است که در صحبت با استخدام‌کنندگان بیش از ۵۰ شرکت که فارغ‌التحصیلان ریاضی را جذب می‌کنند، بسیار شنیده‌ایم که آنها به‌دنبال دانشجویانی هستند که برای زمانی طولانی روی یک مسئله حل‌نشده کار کرده‌اند (مثلاً در یک تجربه پژوهش دوره کارشناسی یا در کارآموزی). شرکت‌ها به‌دنبال جذب دانشجویانی با این نوع تجربه هستند، زیرا مسائل حل‌نشده دقیقاً از نوع مسائلی هستند که کارمندان آنها در بخشی از کار خود با آنها

^۱Council on Undergraduate Research ^۲Center for Undergraduate Research in Mathematics

مواجه می‌شوند [۹]. از طرف دیگر، اگرچه پژوهش دوره کارشناسی از بسیاری جنبه‌ها، شبیه نوع پژوهشی است که شما همراه همکاران انجام می‌دهید اما مهم است که درک کنیم اغلب، تفاوت‌هایی در نحوه انجام این دو نوع پژوهش وجود دارد. افرادی که ادعا می‌کنند شما نمی‌توانید در ریاضیات دوره کارشناسی پژوهش کنید، معمولاً هنوز به این دانش نرسیده‌اند. این تفاوت‌ها در ادامه بحث آشکار خواهند شد اما برای مطالعه بیشتر در شرح فواید منحصر به فرد پژوهش دوره کارشناسی می‌توانید [۹] را بخوانید.

تصدیق می‌کنیم که آنچه هر یک از ما به‌عنوان تجربه «موفق» پژوهش دوره کارشناسی در نظر می‌گیرد، ممکن است متفاوت باشد. پس شما را تشویق می‌کنیم که از خودتان بپرسید: «دلیل این که من پژوهش دوره کارشناسی انجام می‌دهم چیست؟» و «به‌طور کلی من از دانشجویانم و از این تجربه چه انتظاراتی دارم؟» پاسخ‌هایتان به این سؤال‌ها، به شما کمک خواهد کرد تا تعیین کنید که موفقیت از منظر شما چیست و بر نحوه ارتباط شما با «شش‌گام» تأثیر خواهد گذاشت. آیا می‌خواهید دانشجویان کارشناسی را راهنمایی کنید تا پژوهش خودتان را توسعه دهید؟ اگر بله، آیا انتظار دارید از راهنمایی این دانشجویان به انتشار مقاله‌ای برسید و قصد دارید در چه نوع مجله‌ای آن را چاپ کنید؟ آیا می‌خواهید پژوهش دوره کارشناسی را به این دلیل انجام دهید که این، یکی از بهترین راه‌های آموزش مفاهیم ریاضی است؟ آیا می‌خواهید از آن به‌عنوان راهی برای کمک به آمادگی دانشجویان برای تحصیلات تکمیلی یا مشاغل غیردانشگاهی استفاده کنید؟ قبل از آنکه جلوتر برویم، باید صریح باشیم که اینها همگی دلایل کاملاً خوبی برای انجام پژوهش دوره کارشناسی و تعاریف درستی از موفقیت هستند.

ببینیم چگونه جواب‌های شما به این سؤال‌ها می‌توانند بر رویکرد شما در راهنمایی دانشجویان تأثیر بگذارند. فرض کنید شما برنامه‌ریزی می‌کنید تا پژوهش دوره کارشناسی را برای تقویت زمینه پژوهشی خودتان انجام دهید. این طبیعتاً بر نوع مسائل پژوهشی که شما برای دانشجویانتان انتخاب می‌کنید، تأثیر می‌گذارد. با اینکه لازم است مسائلی را انتخاب کنید که برای سطح علمی دانشجویانتان مناسب باشد، این مسائل احتمالاً به برنامه پژوهشی خودتان هم مربوطه خواهند بود. دانشجویان می‌توانند مثال‌هایی بسازند که حالتی خاص از قضیه‌ای باشد که شما ثابت کرده‌اید یا می‌توانند سعی کنند تا قضیه ثابت شده توسط شما را در حالت دیگری بررسی کنند. مثالی را درباره مایکل مطرح می‌کنیم. در آنالیز مختلط، او قضیه‌ای را اثبات کرده است که شامل اعمال تابع $f(z) = z$ روی خانواده‌ای از توابع تحلیلی است. تابع $F(z) = (z - \bar{a}) / (1 - \bar{a}z)$ که $a \in \{z : |z| < 1\}$ ، تعمیمی از تابع $f(z) = z$ است (یعنی وقتی $f = F$ و $a = 0$). مایکل از چند دانشجو خواست تا با استفاده از F به جای f قضیه‌ای مشابه را تنظیم کنند و سپس با استفاده از الگوی قضیه اصلی برای f ، آن قضیه را برای F اثبات کنند.

علاوه بر نوع مسائلی که برای کار کردن انتخاب می‌کنید، هدف شما برای کار کردن روی مسئله‌ای مرتبط با زمینه پژوهشی خودتان نیز بر انتخاب دانشجویان جهت راهنمایی تأثیر می‌گذارد. شما احتمالاً

نخست به دنبال دانشجویان پیشرفته‌تری خواهید گشت که قبلاً اولین درس را در زمینه پژوهشی شما نظیر جبر، نظریه اعداد، توپولوژی یا آنالیز مختلط گذرانده باشند. حالا فرض کنیم تصمیم شما برای انجام پژوهش دوره کارشناسی از علاقه شما برای آماده کردن دانشجویان برای تحصیلات تکمیلی با نشان دادن طعم پژوهش ریاضی نشأت گرفته است. این هدف، امکان‌های بیشتری را برای موضوعات پژوهش فراهم می‌کند. مثلاً الیسون از مطالعه بازی‌های قابل انجام روی نمودارهای گره‌ای، همراه دانشجویان لذت می‌برد. این نوع پژوهش، مفرح است و نیاز به دانش کمی از سوی دانشجویان دارد. او چند دانشجوی پژوهشی خود را دعوت کرد تا یک بازی جدید ابداع کنند که روی نمودارهای گره‌ای قابل انجام باشد و از آنها خواست درباره راهبردهای پیروزی در موقعیت‌های معینی برای شروع بازی، فکر کنند. هدف او چاپ کردن مقاله نبود، بلکه فراهم کردن تجربه پرسیدن سؤال و ارائه طرحی برای پاسخ دادن به سؤال‌های آنها بود. برای بعضی سؤال‌ها لازم بود که دانشجویان مقداری نظریه بازی یاد بگیرند، پاسخ بعضی دیگر به نظریه گره نیاز داشت و بعضی سؤال‌ها هم با نوشتن یک برنامه رایانه‌ای قابل پاسخ بودند. در این سناریوی کلی، سؤال‌ها برای دانشجویان کمتر پیشرفته نیز قابل دسترس هستند. این نوع پروژه پژوهشی می‌تواند فرصت خیلی خوبی برای کار کردن با دانشجویانی باشد که درباره ادامه دادن تحصیل در رشته ریاضی نامطمئن هستند و نیز برای دلگرم کردن دانشجویان خوبی که اعتماد به نفس کمی دارند.

همان‌طور که گیلمن^۱ و سانسلو^۲ در شرح پژوهش دوره کارشناسی در طول سال تحصیلی در دانشگاه والپریزو^۳ می‌گویند [۱۳]، اهداف یک پژوهش موفق دوره کارشناسی این است که پروژه:

«نمونه‌ای از تجربه پژوهشی ریاضیدانان باشد؛ تجربه‌ای از رشد علمی را که مناسب سطح بلوغ دانشجوی شرکت‌کننده است، فراهم کند؛ به دانشجویان کمک کند تا با استادان و دانشکده پیوندهای جدی برقرار کنند؛ و دانشجویان را در اوایل تحصیل با شیوه کشف حقایق جدید در ریاضیات، آشنا کند.»

یک پژوهش موفق دوره کارشناسی بر رشد دانشجویان تمرکز دارد و به دانشجویان اجازه می‌دهد با مطالب در سطحی فراتر از کلاس درس تعامل کنند؛ به آنها اجازه می‌دهد حدس‌ها و اثبات‌های خودشان را ارائه کنند. با در خاطر داشتن مطالب فوق، اکنون «شش گام اساسی» لازم برای هدایت موفق دانشجویان در پژوهش را بیان می‌کنیم. جنبه‌هایی از این گام‌ها در مقالاتی نظیر [۲]، [۴]، [۷]، [۸]، [۱۱]، [۱۳]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] نیز مطرح شده است.

^۱Gillman ^۲Szaniszlo ^۳Valparaiso

گام ۱: انتخاب یک مسئله پژوهشی مناسب

یک مشکل مشترک برای استادانی که راهنمایی دانشجویان کارشناسی در پژوهش را شروع می‌کنند، انتخاب یک مسئله پژوهشی مناسب است. مسئله منتخب شما باید اهداف شما برای پروژه و پیش‌زمینه دانشجویان را لحاظ کند. مسئله‌ای که در فهرست پژوهشی جاری شما قرار می‌گیرد، از مسئله‌ای که با هدف ایجاد فضا برای دانشجویان جهت خلق حدس‌های خودشان انتخاب شده، متفاوت است. صرف‌نظر از اهداف شخصی شما در پژوهش، هنگام انتخاب یک مسئله، لحاظ کردن سطح پیش‌زمینه دانشجویان مهم است. معمولاً استاد راهنماهای تازه‌کار مسئله‌ای را برای پژوهش انتخاب می‌کنند که برای دانشجویان خیلی دشوار است. چگونه می‌توانید از این خطا جلوگیری کنید، مخصوصاً اگر در همکاری پژوهشی با دانشجویان کارشناسی، تجربه چندانی ندارید؟ دوست ما کاترین لئونارد^۱ می‌گوید که او یک مسئله پژوهشی را مناسب می‌داند اگر گمان کند خودش می‌تواند آن را در یک بعد از ظهر آرام حل کند. بعضی ویژگی‌های یک مسئله پژوهشی مناسب برای دانشجویان این موارد هستند:

- (۱) مسئله باید مقدار محدودی پیشنیاز داشته باشد؛
- (۲) باید دقیق و روشن باشد؛
- (۳) باید شامل ساختن مثال‌های خاص باشد و می‌تواند شامل استفاده از رایانه باشد؛
- (۴) باید شامل لایه‌های متعدد باشد که از کمی ساده شروع شده و تا سطوح بالاتر سختی، پیشرفت می‌کند؛
- (۵) باید مورد علاقه شما و جامعه پژوهشی شما باشد؛
- (۶) باید برای این که مسئله احتمالاً چگونه حل می‌شود، ایده‌ای داشته باشید.

مسئله‌ای با لایه‌های متفاوت، در نقطه مقابل یک مسئله «همه یا هیچ» است که در آن، دانشجویان باید نتیجه‌ای را اثبات کنند و اگر چنین نکنند، چیزی برای نمایش تلاش‌هایشان ندارند. مقاله‌ای جدید دربارهٔ PRIMES (برنامه پژوهش در ریاضیات، مهندسی و علوم^۲) که یک برنامه پژوهش ریاضی برای دانش‌آموزان دبیرستانی در MIT است، خیلی از این مؤلفه‌ها برای انتخاب یک مسئله پژوهشی مناسب را شرح می‌دهد [۱۲].

برای مثال، این مسئله را در نظر بگیرید: مساحت یک دایره با شعاع r برابر با $A(r) = \pi r^2$ و محیط آن برابر با $P(r) = 2\pi r$ است. پس $dA/dr = P$. برای کدام شکل‌های هندسی دیگر، این معادله دیفرانسیل برقرار است؟ اگر مربعی با ضلع x را در نظر بگیریم، داریم $A(x) = x^2$ و $P(x) = 4x$. پس $dA/dx \neq P$. اما اگر دایره‌ای به شعاع r را درون مربع محاط کنیم، می‌توانیم

^۱Kathryn Leonard ^۲Program for Research in Mathematics, Engineering and Science

بنویسیم $A(r) = (2r)^2$ و $P(r) = \lambda r$ و در نتیجه $dA/dP = P$. برای چه شکل‌های هندسی دیگری، رابطه $dA/dP = P$ برقرار است و r چه پیوندی با این شکل‌ها دارد؟ درباره شکل‌های هندسی دیگری که برای آنها رابطه $dA/dP = P$ برقرار است، نتایج دیگری را می‌دانیم اما مسائل بیشتری برای بررسی وجود دارد ([۱۰] را ببینید). مشاهده کنید که این مسئله دارای چندین ویژگی یک مسئله مناسب برای دانشجویان کارشناسی است.

اگر نمی‌توانید یک مسئله پژوهشی از حوزه خودتان که برای دانشجویان کارشناسی مناسب باشد، در نظر بگیرید، می‌توانید از منابع مختلف کمک بگیرید تا یک مسئله پیدا کنید. یک دسته از این منابع، مجلاتی هستند که کارهایی در سطح کارشناسی منتشر می‌کنند و نتایجی دارند که به آسانی قابل گسترش هستند؛ مانند *Involve*، *SIAM Undergraduate Research Online*، *MACE Journal* و *UMAP Journal*. همچنین همایش‌هایی که در آنها دانشجویان، پژوهش خود را ارائه می‌کنند؛ مانند *MathFest* جامعه ریاضی آمریکا (MAA)، نشست‌های مشترک ریاضی^۲، یا جلسات بخش‌های محلی MAA می‌توانند منابعی الهام‌بخش باشند. اگر شما از یک کار انجام‌شده توسط دانشجویان کارشناسی، مقاله‌ای جالب بخوانید یا ارائه‌ای ببینید، می‌توانید به استاد راهنمای پروژه پژوهشی مزبور مراجعه کنید تا بدانید چه مسائلی مربوط به پروژه آنها هنوز حل نشده‌اند و روی کدام یک، انتظار نمی‌رود خودشان کار کنند. علاوه بر این، می‌توانید منابع برخط نظیر openproblemgarden.org را در نظر بگیرید که مسائل باز را فهرست و مسائل مناسبی را برای دانشجویان کارشناسی معرفی می‌کند.

در نهایت، توجه کنید که کمی خلاقیت از سوی شما ممکن است کارساز باشد. شاید مسئله‌ای که شما دست‌آخر با دانشجویان بررسی می‌کنید، چیزی نباشد که دقیقاً در یکی از این منابع پیدا کرده‌اید، بلکه نسخه‌ای تغییر یافته توسط خود شما باشد که با اصلاح یک تعریف کلیدی در مسئله اولیه، به دست آمده است. یک بار لارا در همایشی درباره اجتناب از الگو^۳ در درخت‌های نظریه گراف شرکت کرد. سخنران این‌طور تعریف کرده بود که درخت T شامل درخت t است اگر t زیرگرافی از T باشد. لارا تعریف دیگری از الگوی درخت با استفاده از انقباض یال پیشنهاد کرد. سخنران درباره این تعریف فکر نکرده بود و او را تشویق کرد آن را دنبال کند. تعریف جدید، محرک دو پروژه موفق در یک برنامه تابستانی تجربه پژوهش برای دانشجویان کارشناسی^۴ (REU) شد. دانشجویان او، مالک تعریف جدید شدند و کار آنها منجر به مقالاتی مرجع در مجلات معتبر در زمینه ترکیبیات شد.

^۱Mathematical Association of America ^۲Joint Mathematics Meetings ^۳pattern avoidance ^۴Research Experience for Undergraduates

گام ۲: جذب و انتخاب دانشجویان برای راهنمایی

جذب و انتخاب دانشجویان برای کار با شما، دومین گام است. خیلی از دانشجویان خبر ندارند که فرصت‌های پژوهشی دوره کارشناسی وجود دارد یا اگر بدانند، بسیاری فرض می‌کنند که آنها واجد شرایط نیستند. آلیونت^۱ و همکاران [۱] به این پرداخته‌اند که چگونه با این تصورات مبارزه شود. چون دانشجویان آگاه نیستند که برای استفاده از فرصت‌های پژوهشی باید به شما مراجعه کنند، شما باید سراغ آنها بروید! راه‌های مختلفی برای جذب دانشجویان وجود دارد. می‌توانید دانشجویان را در کلاس‌هایی که تدریس می‌کنید پیدا کنید؛ از همکاران بخواهید دانشجویان را معرفی کنند؛ یا به همه گروه‌های ریاضی ایمیل بفرستید و دانشجویانی را که علاقه‌مند هستند با شما پروژه پژوهشی انجام دهند، دعوت کنید. بعضی دانشجویان ممکن است به‌طور طبیعی به سوی شما جذب شوند، زیرا در کلاسی شرکت داشته‌اند که شما تدریس کرده‌اید و از آن لذت برده‌اند.

برای جذب دانشجویان، الیسون دوست دارد در همایش ریاضی دانشجویان کارشناسی^۲ دانشگاه سخنرانی کند تا آنها را علاقه‌مند کند. چند سال پیش، او دربارهٔ شبه‌نمودارهای گره‌ها^۳ و بازی‌های گره‌ها در دانشکده برای دانشجویان سخنرانی کرد. پس از آن، بلافاصله سه دانشجو پرسیدند که آیا می‌توانند با او در پژوهش همکاری کنند. این منجر به یک پروژه ۲ ساله با این دانشجویان شد که نتیجه آن مقاله نشد اما به دانشجویان مهارت‌های ارزشمند پژوهشی را آموخت و به آنها کمک کرد که بفهمند آیا می‌خواهند به تحصیلات تکمیلی بروند یا خیر.

روش موفق مایکل این است که شرح یا ارائه مختصری از پژوهش خود را برای دانشجویان مطرح می‌کند تا آنها را علاقه‌مند کند. زمینه پژوهش مایکل دربارهٔ توابع مختلط همساز است که تعمیمی از توابع تحلیلی هستند و او ویژگی‌هایی را مطالعه می‌کند که تحت پیچش، حفظ می‌شوند. فکر می‌کنید وقتی او سعی می‌کند دانشجویان را جذب کند، پژوهش خود را این‌طور توضیح می‌دهد؟ البته که نه! در عوض، دربارهٔ ساخت لایه‌های صابونی با فرو کردن قاب‌های سیمی در محلول صابون حرف می‌زند و به دانشجویان توضیح می‌دهد که دربارهٔ ویژگی‌های این لایه‌های صابونی مطالعه می‌کند. در واقع، تقریباً هر نیمسال او یک روز در کلاس یک سطل محلول صابون و چند قاب سیمی می‌آورد و چند لایه صابونی را نمایش می‌دهد. دانشجویان شیفته می‌شوند و اغلب یک دانشجو بعداً با او تماس می‌گیرد و از او دربارهٔ انجام پژوهش دوره کارشناسی سؤال می‌کند. (ممکن است تعجب کنید که ارتباط موضوع پژوهش مایکل با فرو کردن قاب‌های سیمی در محلول صابون چیست؟ پاسخ این است که در شرایطی معین، توابع مقدار مختلط همساز به رویه‌های کمیته ارتقاء می‌یابند و رویه‌های کمیته را می‌توان با لایه‌های صابون مدل‌سازی کرد.)

^۱Alayont ^۲Undergraduate Mathematics Colloquium ^۳pseudo-diagrams of knots

دانشجویان پژوهشی فعلی، می‌توانند کارآمدترین جذب‌کنندگان دانشجویان جدید بالقوه برای یک گروه پژوهشی باشند. مثلاً الیسون و دانشجوی پژوهشی او کریستوفر، به همراه چند استاد و دانشجوی دیگر از دانشکده ریاضی به تماشای یک بازی بیسبال رفتند. آنها دانشجوی جوان‌تری به نام کالین را هم تا محل بازی در ماشین خود سوار کردند و لذا فرصتی برای گفتگو پیش آمد. کریستوفر در بیشتر مدت طی مسیر، پژوهش خود را برای کالین شرح می‌داد. چند هفته بعد، کالین به دفتر الیسون مراجعه کرد و پرسید که آیا می‌تواند به گروه پژوهشی ملحق شود. کریستوفر و کالین در سال بعد، گروه پژوهشی خوبی بودند. آنها در پایان سال یک سخنرانی جذاب درباره نتایج خود در یک بخش محلی MAA ارائه کردند و بعد از فارغ‌التحصیلی کریستوفر، یک سال دیگر هم کالین به کار با الیسون روی یک مسئله پژوهشی مرتبط، ادامه داد.

اغلب استادان، پژوهش دوره کارشناسی را با یک دانشجو روی یک مسئله شروع می‌کنند اما با گذشت زمان، خیلی‌ها متوجه می‌شوند که داشتن گروهی شامل دو تا پنج دانشجو که همزمان روی یک مسئله کار کنند، مؤثرتر است. ما هر سه معمولاً سعی می‌کنیم طوری گروه‌های پژوهشی خودمان را تشکیل دهیم که چند دانشجوی پیشرفته و چند دانشجوی تازه‌کار داشته باشیم. دانشجویان پیشرفته اغلب دانشجویانی هستند که برای مدتی طولانی‌تر با ما همکاری پژوهشی داشته‌اند و پیش‌زمینه ریاضی بیشتری دارند. با داشتن یک گروه شامل سطوح مختلف تجربه، می‌توانید از دانشجویان پیشرفته‌تر بخواهید در راهنمایی دانشجویان تازه‌کار درباره برخی مفاهیم و روندهای اولیه پژوهش، به شما کمک کنند. این تجربه راهنمایی، برای دانشجویان پیشرفته خیلی خوب است و موجب صرف‌جویی در وقت شما می‌شود. این کار هنگامی که مشغله ما زیاد بود، واقعاً کمک کرد تا بتوانیم پژوهش دوره کارشناسی را ادامه دهیم. این یک طرح پایدار است. وقتی دانشجویان پیشرفته فارغ‌التحصیل می‌شوند، دانشجویان تازه‌کار نقش دانشجویان پیشرفته را می‌پذیرند و می‌توانند دانشجویان جدیدی را به‌عنوان دانشجویان تازه‌کار جذب کنند. دانشجویان پژوهشی شما می‌دانند که پژوهش شامل چیست و معمولاً فهم بیشتری نسبت به شما درباره مناسب بودن و سازگار بودن دانشجویان دیگر دارند. همچنین دانشجویان پژوهشی شما معمولاً دانشجویانی را جذب می‌کنند که با آنها دوست هستند و در نتیجه مشکلات کمتری در مدیریت پویایی گروه خواهید داشت.

وقتی روشی برای جذب دانشجویان داشته باشید، باید تصمیم بگیرید چگونه دانشجویان را برای انجام پژوهش انتخاب می‌کنید. غالباً استادان می‌خواهند که دانشجویان، حداقلی از پیش‌زمینه ریاضی را داشته باشند. اگر شما در ریاضیات زیستی پژوهش می‌کنید، ممکن است بخواهید دانشجویان، درسی در معادلات دیفرانسیل را گذرانده باشند. اگر پژوهش شما شامل اثبات قضایا است، ممکن است بخواهید دانشجویان درس «مقدمه‌ای بر اثبات» را گذرانده باشند. متوجه شده‌ایم که مهم‌ترین ویژگی برای یک

دانشجوی پژوهشگر دوره کارشناسی، این است که سختکوش و مشتاق پژوهش باشد. تجربه نشان می‌دهد این خیلی مهم‌تر از هوش یا سطح پیش‌زمینه ریاضی است.

زمینه پژوهش مایکل، آنالیز مختلط است و عادت دارد دانشجویانی را برای راهنمایی در نظر بگیرد که در درس کارشناسی آنالیز مختلط نمره A گرفته‌اند. او فکر می‌کرد آنها برای شروع، به این پایه از نمره نیاز دارند. در یک نیمسال، گروه پژوهشی او شامل سه دانشجوی کارشناسی بود که یک نیمسال بود با او کار می‌کردند و یک دانشجوی مشتاق، از او درخواست کرد تا در گروه پژوهشی حضور داشته باشد. یک سال دومی بود که آنالیز مختلط را نگذرانده بود اما سخت‌کوش بود. مایکل ریسک کرد و او را پذیرفت. از اینکه او چقدر از دانشجویان دیگر در گروه پژوهشی آموخت و چقدر به تنهایی یاد گرفت، مایکل خوشنودانه شگفت‌زده شد.

الیسون یک برنامه REU برای دانشجویان اجرا می‌کند که حداقل پیش‌نیاز آن «حسابان ۳» است. برای پروژه‌هایی در حوزه‌هایی مانند نظریه گره، ترکیبیات و آمار لازم نیست همه اعضای گروه در ریاضی دارای سطحی بالاتر از آنچه باشند که چند نیمسال حسابان می‌تواند فراهم کند. اگر دانشجویان شما با انگیزه باشند، می‌توانند هنگام انجام پژوهش، خلأهای علمی خود را مثلاً با کمک دانشجویان همکار، پُر کنند. علاوه بر این، وقتی دانشجویان به دلیل نیاز به حل یک مسئله پژوهشی، مطلبی پیشرفته را یاد می‌گیرند، آن را نسبت به وقتی که فقط یک درس را می‌گذرانند، عمیق‌تر می‌آموزند.

گام ۳: مشخص کردن انتظارات و مدیریت پویایی گروه

قبل از اینکه درگیر پژوهش شوید، باید بعضی قوانین پایه و انتظارات را با دانشجویان مطرح کنید. به یاد داشته باشید که دانشجویان کارشناسی در پژوهش مبتدی هستند. ممکن است شما هنگام کار با همکاران قواعدی داشته باشید که دانشجویان از آنها آگاه نباشند یا تصویری درباره آن نداشته باشند. احتمالاً درباره اینکه پروژه چطور سازمان خواهد یافت، دیدگاهی دارید اما ممکن است دانشجویان دیدگاهی متفاوت یا مبهم در مورد چگونگی عملکرد گروه داشته باشند. باید با دانشجویان بنشینید و درباره ساختار یا قوانین کار کردن با شما و همدیگر گفتگو کنید. بعضی موارد بحث روشن هستند مانند اینکه چه زمانی و کجا برای انجام پژوهش ملاقات خواهید کرد. موارد دیگری هم باید مطرح شوند: انتظار می‌رود دانشجویان چند ساعت در هفته روی پروژه کار کنند و اگر کسی نتواند در یک جلسه ملاقات حاضر شود، چه باید بکند؟ همچنین مهم است که بعضی انتظارات بلندمدت هم مطرح شوند مانند اینکه انتظار می‌رود دانشجویان چه خروجی‌هایی تولید کنند (مثلاً یک گزارش مکتوب پایانی، ارائه‌ای برای افراد خارج از گروه، یک پوستر). موضوع مهم دیگری که اغلب گفته نمی‌شود، پویایی گروه است. منظور ما از پویایی گروه، نحوه تعامل اعضای گروه با یکدیگر است. دانشجویان در گروه پژوهشی شما، علاوه بر تفاوت در پیش‌زمینه ریاضی،

در چگونگی ارتباط با یکدیگر و در برخورد با موقعیت‌ها هم دارای تفاوت‌هایی هستند. کاترین لئونارد [۱۵] بعضی موضوعات مربوط به پویایی گروه بین دانشجویان را فقدان ارتباط، همراهی نامنظم، کشمکش قدرت و عدم تحمل نقد سازنده بر می‌شمارد. هانا کلندر^۱ [۴] قبل از شروع پژوهش، به دانشجویان ایمیل می‌فرستد و از آنها می‌خواهد به سؤالاتی از این دست پاسخ دهند: «در تجربیات گروهی پیشین، چه چیزی برای شما سودمند بود و چه چیزی نبود؟» «برای شما بهترین روش برای اینکه انتقادی را دریافت کنید چیست؟» «اگر دچار کشمکش شوید، چه می‌کنید؟» «سؤال‌ها یا نگرانی‌های فعلی شما چیست؟» در اولین جلسه گروه، هانا گفتگویی را درباره پاسخ‌های مختلف دانشجویان ترتیب می‌دهد، راه‌های مؤثر مدیریت کشمکش و برخورد با انتقاد را مطرح می‌کند و در مورد انتظارات متفاوت هر عضو گروه صحبت می‌کند. او نوشته است: «وقتی یک دانشجو درباره خود صحبت می‌کند، اغلب موجب رفع نگرانی دانشجویان دیگری می‌شود که همان احساس را دارند اما از بیانش واهمه دارند.» مشخص کردن انتظارات از پروژه، یک موضوع مهم آموزشی است که می‌تواند به آماده‌سازی محیطی کمک کند که در آن دانشجویان به‌جای اینکه در برابر چالش‌ها تسلیم شوند، به‌راحتی با هم همکاری و در صورت نیاز، درخواست راهنمایی می‌کنند.

گام ۴: شروع پژوهش و به پیش بردن آن

به خاطر آوردید که شما زمان و تلاش زیادی را صرف این کرده‌اید که بیاموزید چطور پژوهش کنید. شاید فراموش کرده باشید که وقتی شروع می‌کردید، وضعیت چگونه بود. اگر به نگرانی‌هایی که در شروع مسیر پژوهش داشتید فکر کنید، خواهید فهمید که مطرح کردن فرآیند انجام پژوهش با دانشجویان، سرمایه‌گذاری ذهنی مهمی برای آنها است؛ مخصوصاً اگر مبتدی باشند. در طی پروژه پژوهشی، خوب است که این موضوع را به دانشجویان یادآوری کنید که کشمکش پژوهشگران با مشکلات، امری طبیعی محسوب می‌شود.

برنامه CURM [۵] هر تابستان یک کارگاه آموزشی سه‌روزه برای استادان برگزار می‌کند. در طی این کارگاه، یکی از فعالیت‌ها این است که فهرستی از چیزهای مهمی تهیه شود که استادان درباره پژوهش می‌دانند اما احتمالاً دانشجویان آنها نمی‌دانند. اینجا فهرستی از ۱۲ مورد مهم مشترک را می‌آوریم. خوب است که این فهرست، هنگام انجام پژوهش توسط دانشجویان، در اختیار ایشان گذاشته شود. این کار کمک می‌کند تا دانشجویان بدانند که حس ناامیدی و پیشرفت آهسته، به‌علت نبود مهارت‌های ریاضی در ایشان نیست، بلکه چنین احساس‌هایی بین همه ریاضیدان‌هایی که پژوهش می‌کنند، مشترک است. فهرست از این قرار است:

(۱) از پرسیدن «چرا؟» نترسید؛

- (۲) نفهمیدن یک ایده در دفعه اول (یا در دفعه دوم، یا دفعه سوم یا ...) اشکالی ندارد؛
- (۳) ما همه گیر می‌کنیم و ناامید می‌شویم. وقتی این اتفاق می‌افتد:
 - (آ) استراحت کنید؛
 - (ب) برای یک نفر توضیح دهید چرا گیر کرده‌اید (شخصی آشنا یا ناآشنا با ریاضی)؛
 - (ج) مطالب پیش‌زمینه را مرور کنید؛
 - (د) ببینید آیا مسئله را می‌توان تغییر داد (مسائل از سنگ ساخته نشده‌اند)؛
 - (ه) مفروضات را بررسی کنید؛
 - (و) یک مثال ساده را در نظر بگیرید؛
 - (ز) ادامه دهید.
- (۴) کارهای چاپ شده معلوم نیست همیشه درست باشند، از جمله کارهای استاد راهنمای شما؛
- (۵) از ایده‌ها و رویکردهای متفاوت استقبال کنید. زمانی شما به ایده یا رویکردی نیاز خواهید داشت که خودتان باید آن را یاد بگیرید. در این حالت، باید با دقت درباره آن ایده بیندیشید تا سرانجام خودتان آن را بفهمید؛
- (۶) ممکن است پروژه شما در جهتی کاملاً متفاوت از آنچه فکر می‌کردید، حرکت کند؛
- (۷) همه چیز از اندازه‌ای که فکر می‌کنید، بیشتر طول می‌کشد. صبور باشید؛
- (۸) اشتباه کردن، ایرادی ندارد. اشتباه کردن راه خوبی برای یاد گرفتن است؛
- (۹) سخت‌کوشی و پشتکار لازم است (اما کافی نیست). در حقیقت سخت‌کوش بودن مهم‌ترین ویژگی یک دانشجوی موفق است؛
- (۱۰) نیازی نیست شما همه پیشنهادها را موضوع را بدانید (و نمی‌توانید بدانید)؛
- (۱۱) همکاری کردن را یاد بگیرید؛
- (۱۲) پژوهش دشوار ولی رضایت‌بخش است.

در شروع پژوهش، خوب است که مقداری از مطالب پیش‌زمینه گفته شود. راه‌های گوناگونی برای انجام این کار وجود دارد. بعضی استادان یادداشت‌هایی برای یادگیری دانشجویان آماده می‌کنند، برخی استادان از دانشجویان می‌خواهند مطالب را از کتاب‌ها یا مجلاتی که در سطح دانشجویان نوشته شده، بخوانند و عده‌ای دیگر از استادان، از دانشجویان می‌خواهند مقالات پژوهشی در سطح استادان را بخوانند. اگر شما از روش آخر استفاده می‌کنید، در انتخاب مقالات پژوهشی در سطح استادان دقت کنید. یک بار، یکی از همکاران به مایکل مراجعه کرد و گفت او سعی کرده با یک دانشجوی کارشناسی کار پژوهشی کند اما ناموفق بوده است. همکار مایکل گفت که او به دانشجویی در کلاس آنالیز حقیقی، آخرین مقاله خود را در آنالیز تابعی داده و به او گفته تا مقاله را بخواند و هر وقت سؤال داشت، مراجعه کند. اما این دانشجو

هیچ وقت نیامده بود. روشن است که مشکل این بوده که مقاله مزبور برای آن دانشجو، خیلی پیشرفته بوده است. احتمالاً فهم آن برای هر یک از ما سخت است! پس مطمئن شوید که مطالبی که به دانشجویان می‌دهید، برای آنها به‌سادگی قابل فهم باشد. دانستن اینکه چه سطحی از مطالب برای دانشجویان به‌آسانی قابل فهم است، اغلب نیازمند زمان و تجربه است.

اشتباه دیگری که غالباً استادان در آغاز پژوهش توسط دانشجویان مرتکب می‌شوند، برعکس حالت فوق است. استادان راهنما گمان می‌کنند قبل از اینکه دانشجویان بتوانند پژوهش را شروع کنند، باید مقدار عظیمی از مطالب پیش‌زمینه را توضیح دهند. این وضعیتی است که خیلی از ما استادان راهنما هنگامی که در تحصیلات تکمیلی شروع به پژوهش کرده‌ایم، به آن دچار شده‌ایم. متأسفانه این نوع تفکر، یکی از دلایلی است که چرا بعضی استادان به‌اشتباه گمان می‌کنند که دانشجویان کارشناسی نمی‌توانند پژوهش کنند. این استادان، انجام پژوهش توسط دانشجویان کارشناسی را مانند انجام پژوهش توسط دانشجویان دکترا تصور می‌کنند که در آن، قبل از اینکه دانشجو بتواند مسائل پژوهشی را بررسی کند، استاد باید حجم زیادی ریاضی را ارائه کند. ولی ما متوجه شده‌ایم که اگر دانشجویان کارشناسی روی چند ایده اصلی که برای شروع پژوهش لازم دارند، تمرکز کنند، وقتی مشغول کار شدند، ایده‌های دیگر را یاد خواهند گرفت. علاوه بر این، زودتر شروع کردن پژوهش برای آنها جذاب‌تر و لذت‌بخش‌تر است.

یک بار مایکل طرح پژوهشی REU یک همکار را خواند که در آن، او می‌خواست ۵ یا ۶ هفته از ۸ هفته برنامه را به آموزش مطالب پیش‌زمینه به دانشجویان کارشناسی بگذراند و سپس در چند هفته باقیمانده به آنها اجازه دهد روی پژوهش کار کنند. چنین طرح‌هایی حمایت مالی نمی‌شوند؛ مدت زمان‌های تعیین شده برای یادگیری و کار کردن روی مسائل پژوهشی دقیقاً وارونه بودند.

توصیه می‌کنیم از این تصور اشتباه دوری کنید که ابتدا باید مطالب خیلی زیادی را توضیح دهید تا دانشجویان بتوانند روی مسائل پژوهشی شروع به کار کنند. چه مقدار زمان برای مطالب پیش‌زمینه مناسب است؟ مایکل در ۱۵ تا ۲۵ درصد اول مدت زمان پروژه پژوهشی، مطالب پیش‌زمینه را ارائه می‌کند. در این مدت، دانشجویان روی مسائل ابتدایی کار می‌کنند و از مسائل پژوهشی ممکن آگاه می‌شوند. سپس مسائل پژوهشی ممکن را که قبلاً در مورد آن بحث کرده‌اند، به‌طور مختصر بیان می‌کند و به دانشجویان اجازه می‌دهد مسئله‌ای را که می‌خواهند روی آن کار کنند، انتخاب کنند. بعد از چند سال پیروی از این روش، مایکل تصمیم گرفت مطالب پیش‌زمینه را به‌صورت مکتوب مدون کند. او چند صد تمرین و مسئله اکتشافی را هم برای استفاده دانشجویان اضافه کرد. این یادداشت‌ها به دو فصل از کتابی دربارهٔ مباحثی از آنالیز مختلط برای دانشجویان کارشناسی تبدیل شدند [۳].

حتی اگر قصد ندارید کتابی بنویسید، نقطه‌ای روشن را برای شروع کار دانشجویان تعیین کنید. پژوهش لارا درباره ترکیبیات شمارشی است. او دوست دارد در اولین ملاقات، چند تعریف مهم را برای

دانشجویان بیان کنند. دانشجویان دربارهٔ این تعریف‌ها بحث می‌کنند تا جایی که همهٔ اعضای گروه بتوانند مثال‌هایی مناسب و منطبق با آنها ارائه کنند. سپس او دو یا سه مسئلهٔ باز مرتبط با آن تعاریف را برای دانشجویان مطرح می‌کند و آنها را تشویق می‌کند تا مسائل را بررسی کنند و بگویند مایلند در جلسهٔ دوم، کدام مسئله را شروع کنند. دانشجویان به‌جای زمانی دیرتر در پروژه، از هفتهٔ اول صاحب مسئله می‌شوند. وقتی دانشجویان سرگرم پژوهش را ملاقات می‌کنید، چه اتفاقی می‌افتد؟ تجربهٔ ما این است که دانشجویان مایلند طرح یا ساختاری برای جلسات وجود داشته باشد. هر یک از ما وقتی که قرار است تدریس کنیم، آنچه را که می‌خواهیم در کلاس انجام دهیم، آماده می‌کنیم. وقتی که قرار است جلسهٔ یک کمیته را برگزار کنیم، دستور جلسه را آماده می‌کنیم. باید هنگامی هم که دانشجویان را راهنمایی می‌کنیم، یک برنامهٔ ساخت‌یافته آماده کنیم. البته اگر یک ایدهٔ خوب نمایان شود که به پرورش بیشتری نیاز داشته باشد، می‌توانیم از برنامهٔ مزبور منحرف شویم. برای ما انحراف از برنامه وقتی راحت‌تر است که از قبل آماده شده باشیم.

در چند جلسهٔ اول با دانشجویان جدید، از آنها می‌خواهیم مطالبی را خوانده و روی مسائل خاص مرتبط کار کنند. از دانشجویان در مورد خوانده‌هایشان سؤال می‌کنیم و می‌خواهیم راه‌حل‌هایشان را برای مسائل داده‌شده مطرح کنند. دانشجویان را تشویق می‌کنیم که با هم روی مسائل کار کنند. درست مشابه کلاس، اگر دانشجویی نتواند یک مسئله را حل کند، احتمالاً دیگر اعضای گروه هم دربارهٔ آن به کمک احتیاج دارند. در این حالت، می‌توانیم زمانی را برای بحث گروهی دربارهٔ آن مسئله اختصاص دهیم. وقتی دانشجویان از مرحلهٔ مطالب پیش‌زمینه گذشتند، ساختار جلسه را کمی تغییر می‌دهیم. حالا در جلسات، بعضی ایده‌هایی را که مطرح کرده‌ایم مرور می‌کنیم، مواردی را که می‌توان روی آنها کارکرد فهرست می‌کنیم و دربارهٔ کار کردن روی هر یک از موارد، نظر می‌دهیم.

فرض کنید گروه در حال بررسی قضیه‌ای بوده است و با تغییر بخش‌هایی از قضیه، به یک حدس رسیده‌ایم. چندین کار می‌توانیم انجام دهیم. اول اینکه یک نفر می‌تواند یادداشت‌های مرتبط با مباحث این روز را به‌صورت مکتوب مدون کند. دوم اینکه یک نفر می‌تواند با جستجو در [arXiv](#)، [MathSciNet](#)، یا اینترنت ببیند که آیا کسی دربارهٔ این حدس مقاله‌ای نوشته است یا نه. سوم اینکه یک نفر می‌تواند با استفاده از رایانه، سعی کند مثال‌های بیشتری از این حدس را تولید کند و ببیند که آیا می‌توانیم یک مثال نقض پیدا کنیم. چهارم اینکه برای اثبات حدس، خوب است که ایده‌های اساسی اثبات قضیهٔ اصلی را بفهمیم. بنابراین یک نفر می‌تواند اثبات را دوباره بخواند و اجزای مهم اثبات را برای گروه ارائه کند. پنجم اینکه یک نفر می‌تواند با تقلید از اثبات قضیه و درج حدس‌های جدید مناسب در بخش‌هایی از اثبات که شامل اجزای قدیمی قضیه هستند، سعی کند حدس را ثابت کند. دانشجویان می‌توانند تصمیم بگیرند چه کسی مایل است کدام وظیفه را انجام دهد. هر دانشجو حداقل یک وظیفه را می‌پذیرد و ممکن است بیش

از یک دانشجوی روی یک وظیفه کار کنند. دانشجویان باید بدانند که در جلسه بعدی، انتظار می‌رود هر کس درباره وظیفه‌ای که داشته است، گزارش دهد. معمولاً بیشتر وظایف تا جلسه بعدی تکمیل نمی‌شوند اما دانشجویان باز باید گزارش پیشرفت بدهند و مشکلات غیرمنتظره را بگویند. سپس گروه وظایف جدیدی را تعیین می‌کند یا کار روی وظایف قبلی را ادامه می‌دهد. دانشجویان درباره اینکه چطور به پیش بروند، راهنمایی می‌شوند؛ آنها تنها نیستند. از طرف دیگر، دانشجویان آزادند تا وظیفه‌ای را انتخاب کنند که با توانایی و مهارت‌های آنها انطباق دارد. همچنین دانشجویان یک کار خاص برای انجام دادن تا جلسه بعدی دارند.

در طول سال تحصیلی، معمولاً یک یا دو جلسه یک‌ساعته در هفته داریم. ماهیت جلسه همه را تشویق می‌کند که صحبت کنند و ایده‌ها را به اشتراک بگذارند. دانشجویان می‌بینند که در ریاضیات پژوهش چطور انجام می‌شود، فنون حل مسئله را یاد می‌گیرند و استقلال را پرورش می‌دهند. بعضی از این اهداف در [۲] مطرح شده است.

لازم است خاطر نشان کنیم که شما باید با دانشجویان گفتگو کنید و آنها را واقعاً بشناسید. ارتباط بیشتر استاد راهنما با دانشجو، یکی از مزایای این نوع پژوهش است. گاهی با شکستن روال عادی پژوهش و آوردن خوراکی (مثلاً شیرینی یا پیتزا)، می‌توانید دانشجویان را خوشحال کنید. در برنامه‌های پژوهشی تابستانی، می‌توانید میزبان بازی، تماشای فیلم یا گردش باشید. می‌توانید دانشجویان را به یک مسابقه ورزشی ببرید یا با هم به کوهنوردی بروید. اگر احساس می‌کنید دانشجویان شما بسیار سخت کار می‌کنند یا مدت مدیدی است که مشغول هستند یا اگر چیزی برای جشن گرفتن دارید، بدون اعلام قبلی، آنها را به صرف بستنی مهمان کنید!

گام ۵: کمک به دانشجویان برای پرورش مهارت‌های ارتباطی

تفاوت مهم دیگری که در پژوهش به همراه دانشجویان کارشناسی خواهید دید این است که آنها در نوشتن و ارائه ریاضیات به راهنمایی نیاز دارند. پرورش این مهارت‌های ارتباطی بسیار مهم است و لازمه آن، تمرین توسط دانشجویان و بازخوردهای سودمند از طرف استادان است. مایکل با استخدام کنندگان بیش از ۵۰ شرکت که فارغ‌التحصیلان ریاضی را جذب می‌کنند، گفتگو کرده است. آنها به چهار چیز اشاره کرده‌اند که دانشجویان ریاضی علاوه بر کسب مدرک ریاضی باید انجام دهند. داشتن مهارت‌های ارتباطی مؤثر (یعنی نوشتن و صحبت کردن) یکی از این چهار چیز مهم است. این موضوع، طرز فکر او درباره مهارت‌های ارتباطی را عوض کرده است و حالا از هر دانشجوی کارشناسی می‌خواهد تا بیرون از دانشکده ریاضی یک سخنرانی انجام دهد و از گروه می‌خواهد تا یک مقاله پژوهشی بنویسند. این فعالیت‌ها غالباً تأثیرات قابل توجهی بر دانشجویان می‌گذارند. همچنین برگزاری ارائه و نوشتن مقاله، حسن ختامی برای

پروژه به‌شمار می‌رود و برای دانشجویان، دو محصول ملموس از تجربه پژوهشی فراهم می‌شود که می‌توانند آنها را در رزومه یا سوابق خود قرار دهند. علاوه بر این، هر دوی این فعالیت‌ها می‌توانند منابع مفیدی برای گروه پژوهشی بعدی شما باشند؛ وقتی گروه بعدی دانشجویان برای ارائه خود اسلاید درست می‌کنند، می‌توانند از اسلایدهای ارائه‌های گروه قبلی به‌عنوان مثالی از اینکه سخنرانی چگونه باید باشد، استفاده کنند. مقاله پژوهشی هم هنگامی که دانشجویان جدید شروع به پژوهش می‌کنند، مقداری از مطالب پیش‌زمینه را برای مطالعه تأمین می‌کند که در سطح مناسب آنها نوشته شده است.

فرصت‌های زیادی برای دانشجویان وجود دارد تا ارائه‌ای خارج از دانشکده داشته باشند. بعضی دانشگاه‌ها یک روز جشن دارند که در آن، دانشجویان می‌توانند پژوهش خود را ارائه کنند. همچنین دانشجویان کارشناسی می‌توانند در جلسه بخش محلی MAA خودشان، همایش‌های ملی پژوهش دوره کارشناسی^۱ (NCUR)، جلسات MAA MathFest و نشست‌های مشترک ریاضی سخنرانی کنند. برای دو مورد آخر، MAA با تأمین کمک هزینه از دانشجویانی که سخنرانی می‌کنند، حمایت مالی می‌کند.

خیلی از دانشجویان (مانند خیلی از استادان!) از حرف زدن درباره پژوهش خود مقابل جمعیت می‌ترسند و میزان این ترس می‌تواند ملایم تا شدید باشد. پادزهر این ترس، تمرین است. دانشجویان هرچه بیشتر تمرین سخنرانی کنند، در ارائه ماهرتر می‌شوند و به قابلیت‌های ارتباطی خودشان اعتماد بیشتری پیدا می‌کنند. بنابراین از دانشجویان بخواهید تا به‌طور منظم درباره پژوهش خودشان، برای گروه سخنرانی ارائه بدهند. مثلاً در طی یک برنامه ۸ هفته‌ای، می‌توانید از دانشجویان بخواهید تا هفته‌ای یک بار ارائه بدهند. بعد از یک ارائه، افراد گروه می‌توانند بازخورد بدهند، مثلاً «وقتی گفتی ...، منظورت را متوجه نشدم.» یا «فکر می‌کنم یک مثال یا تصویر کمک کند تا مخاطبان منظورت را متوجه شوند.» هیگینز^۲ و همکاران [۱۴] درباره ارائه پوسترها و سخنرانی کردن، توصیه‌های عالی و مفصلی دارند.

وقتی دانشجویان درباره پژوهش خودشان مقاله‌ای می‌نویسند، مطمئن شوید که این کار را زود شروع می‌کنند. یکی از مشکلات رایجی که ما شنیده‌ایم این است که استاد و دانشجویان قبل از اینکه نوشتن را شروع کنند، خیلی صبر می‌کنند. در نتیجه بی‌انرژی می‌شوند و هرگز چیزی نوشته نمی‌شود یا با عجله زیاد باید در عرض چند روز یک مقاله بنویسند. برای جلوگیری از این مشکل، متوجه شده‌ایم که خوب است زود هنگام از دانشجویان بخواهیم تا بخش‌هایی از گزارش پژوهش را بنویسند (مثلاً اولین بار می‌تواند در میانه پروژه انجام شود). سپس دانشجویان آن را به ما تحویل می‌دهند و ما به‌صورت دقیق بازخورد می‌دهیم. از آنها می‌خواهیم با اعمال بازخوردهای ما و درج مطالب جدید، نوشته خود را اصلاح کنند. توصیه می‌کنیم که قبل از رسیدن به چند هفته آخر پروژه، از دانشجویان تحویل دو یا سه پیش‌نویس را بخواهید. اغلب، پایان پروژه پژوهشی، در آخر نیمسال یا در آخر تابستان است. اگر گروه پژوهشی تا

^۱National Conferences on Undergraduate Research ^۲Higgins

انتهای پروژه برای شروع نوشتن مقاله صبر کند، تحت فشار سایر وظایف آخر نیمسال یا تابستان قرار خواهند گرفت و این، نوشتن مقاله را سخت خواهد کرد یا حداقل محصول نهایی کیفیت کمتری خواهد داشت. بعد از اتمام پروژه، نوشتن مقاله حتی سخت‌تر هم می‌شود.

یک رویکرد فعالانه‌تر این است که از دانشجویان خواسته شود در بخش‌هایی کوچکتر از یک پیش‌نویس کامل مقاله پروژه، کار خود را بنویسند. لارا هرگاه با گروهی از دانشجویان کار می‌کند، در اولین جلسه، یک پوشه مشترک Dropbox در اینترنت ایجاد می‌کند. هنگامی که دانشجویان یک کار رایانه‌ای انجام می‌دهند، یک اثبات را می‌نویسند یا یادداشت‌های جلسه‌ای را مدون می‌کنند، کار خود را در این فضای مشترک ذخیره می‌کنند. در واقع، هر وقت یک دانشجو ایده‌ای برای یک اثبات داشته باشد، لارا از او می‌خواهد که ظرف یک هفته آن را نوشته و در پوشه مشترک قرار دهد. او پیش‌نویس و یادداشت‌هایش درباره آن را در جلسه بعد بازمی‌گرداند و هر بار، ویرایش یک اثبات را مد نظر قرار می‌دهد. این روش مزایای گوناگونی دارد: نوشتن یک نتیجه در هر دفعه، بخش‌هایی را که انجام آن کمتر ترسناک است، ایجاد می‌کند. همچنین دانشجو با در اختیار داشتن مجموعه‌ای از نوشته‌های کوچک و روشن در هر نقطه از پروژه، به راحتی و بدون از دست دادن اطلاعات، می‌تواند به سابقه آنچه انجام داده‌اند، دسترسی داشته باشد. دست‌آخر اینکه وقتی دانشجویان آماده نوشتن مقاله هستند، تمرکز آنها روی روایت بین اثبات‌ها خواهد بود، زیرا ریاضیات واقعی قبلاً در چندین پیش‌نویس ویرایش شده است! در هر حوزه‌ای، فرایند نوشتن با تکرار کردن و انجام اصلاحات، بهبود می‌یابد. شروع زود هنگام فرایند نوشتن، به جلوگیری از مشکلات بعدی کمک می‌کند.

گام ۶: تدارک برای آینده

همزمان با اینکه پروژه شما به پایان نزدیک می‌شود، می‌توانید کارهایی انجام دهید تا به بهبود توانایی شما در آینده برای راهنمایی دانشجویان کارشناسی در پژوهش کمک کند. اول، از دانشجویان پژوهشی خود بخواهید بنویسند که اگر زمان بیشتری داشتند، دوست داشتند روی چه مسائلی کار کنند. مایکل و الیسون از دانشجویان پژوهشی خود می‌خواهند که در انتهای مقاله پژوهشی، این کار را انجام دهند. این فهرست از مسائل می‌تواند منبع بسیار خوبی از مسائل بعدی برای دانشجویان پژوهشی جدید باشد. این راهبرد، مؤثر است به ویژه اگر شما از دانشجویان جدید بخواهید مقاله دانشجویان قبلی را به عنوان مطالب پیش‌زمینه بخوانند. با این کار، دانشجویان جدید شما در پایان مقاله‌ای که می‌خوانند، دارای فهرستی از مسائل پژوهشی جدید می‌شوند.

دوم، در نزدیکی پایان پروژه پژوهشی، زمانی را به تأمل درباره تجربه‌تان اختصاص دهید. درباره اینکه چه چیزی خوب پیش رفت، چه چیزی خوب پیش نرفت و تمایل دارید دفعه بعد چه کاری را به صورتی

متفاوت انجام دهید، یادداشت بردارید. مهم است که این کار وقتی انجام شود که تفکرات در ذهن شما تازه هستند. این یادداشت‌ها به شما کمک خواهند کرد تا مهارت‌های راهنمایی خود را بهتر کنید. برای مثال، در پایان نخستین برنامه تابستانی REU، الیسون متوجه شد که بعضی از دانشجویان او درگیر تردید و این احساس بوده‌اند که لازم بوده در اوایل تابستان توانایی خودشان را نشان دهند. با دانستن این موضوع، الیسون و دیگر استادان راهنمای REU به یاد سپردند که سخنرانی‌های تهییجی بیشتری برای دانشجویان انجام دهند و در آغاز برنامه‌های بعدی، به روشنی به این موضوع بپردازند.

سوم، تاریخچه فعالیت‌های خود را نگهداری کنید. این مشتمل است بر نگهداری یک فایل رایانه‌ای از اسامی و اطلاعات تماس دانشجویانی که با آنها کار کرده‌اید، سخنرانی‌هایی که انجام داده‌اند، مقالاتی که نوشته‌اند، جوایزی که برده‌اند و برنامه آینده آنها. همچنین می‌توانید یک یا دو پاراگراف در مورد هر دانشجو بنویسید تا در آینده برای نوشتن توصیه‌نامه به شما کمک کند. به یاد آوردن همه این چیزها درست بعد از پایان همکاری با دانشجویان آسان است ولی هرچه با دانشجویان بیشتری کار کنید، سودمندی نگهداری فایلی از اطلاعات دانشجویان بیشتر معلوم می‌شود. اطلاعات مربوط به موفقیت‌های دانشجویان شما برای ارتقاء شغلی، درخواست کمک هزینه مربوط به پژوهش دوره کارشناسی و جوایز تدریس و راهنمایی دانشجویان سودمند است.

در نهایت، درباره راه‌هایی فکر کنید که می‌توانید به وسیله آنها نتایج برنامه‌های پژوهش دوره کارشناسی خودتان را با رئیس مؤسسه و فارغ‌التحصیلان به اشتراک بگذارید. هنگام انجام این کار، تمرکز شما روی این باشد که درباره دانشجویان و آنچه انجام داده‌اند، صحبت کنید و نه درباره خودتان. هنگامی که دانشجویان مشغول پژوهش یا سخنرانی هستند، از آنها عکس بگیرید و در اختیار روابط عمومی مؤسسه‌تان قرار دهید تا به شما در ترویج کارتان کمک کنند.

اکنون که «شش گام اساسی» را مطرح کردیم، با بیان مختصر بعضی اشتباهات رایج در انجام پژوهش دوره کارشناسی و ارائه یک پیشنهاد سودمند جایگزین در هر مورد، این راهنما را به پایان می‌بریم:

- (۱) مسئله‌ای را برای پژوهش به دانشجویان ندهید که خیلی سخت یا یک مسئله «همه یا هیچ» باشد، بلکه مسئله‌ای انتخاب کنید که از دیگر کارهای دوره کارشناسی الهام گرفته باشد یا بتوانید آن را در مدتی کوتاه حل کنید. همچنین آماده اصلاح آن در جریان پیشرفت پروژه باشید؛
- (۲) صبر نکنید مشکلات بروز کنند، بلکه انتظارات را در ابتدا با دانشجویان مطرح کنید؛
- (۳) سعی نکنید پیشنیازهای زیادی ارائه کنید، بلکه زمان فراوانی برای کار کردن عملی روی مسئله پژوهشی اختصاص دهید؛

- (۴) جلسات با دانشجویان را فی‌البداهه برگزار نکنید، بلکه یک ساختار قابل پیش‌بینی ایجاد کنید که مشوق مشارکت و پرسیدن سؤال توسط همه است؛
- (۵) فرض نکنید دانشجویان شما می‌دانند چگونه ارائه دهند، بلکه از دانشجویان بخواهید قبل از اینکه برای عموم سخنرانی کنند، در فضایی امن سخنرانی کردن را تمرین کنند؛
- (۶) برای شروع نوشتن، تا انتهای برنامه پژوهشی صبر نکنید، بلکه دانشجویان را تشویق کنید تا در هنگام کشف حدس‌ها و نتایج، پیش‌نویس آنها را بنویسند.

امیدواریم مستقل از اینکه شما یک استاد راهنمای با تجربه یا یک تازه‌کار در پژوهش دوره کارشناسی هستید، این راهنما به شما کمک کند تا درباره اینکه چگونه چطور یک راهنمای بسیار خوب برای پژوهش باشید، عمیق‌تر فکر کنید. اگر آنچه اینجا خواندید را سودمند یافتید، منتظر کتاب آتی ما درباره راهنمای دانشجویان کارشناسی در پژوهش ریاضی باشید.^۱

مراجع

- [1] Alayont, F., Y. Babenko, C. Jackson, Z. Szaniszló, Challenges in promoting undergraduate research in the mathematical sciences, *Involve, A Journal of Mathematics*, 7 (2014), no. 3, 265–271.
- [2] Bailey, B., M. Budden, M. Dorff, U. Ghosh-Dastidar, Undergraduate research: How DO WE BEGIN? *MAA Focus*, 29 (2009), no. 1, 14–16.
- [3] Brilleslyper, M. A., Dorff, M. J., McDougall, J. M., Rolf, J. S., Schaubroeck, L. E., Stanke-witz, R. L., Stephenson, K., Explorations in Complex Analysis. *Classroom Resource Materials Series*, Washington, DC: Mathematical Association of America, 2012.
- [4] Callender, H. L., Keys to Successful Mentoring of Undergraduate Research Teams with an Emphasis in Applied Mathematics Research, *Proceedings of the 6th annual International Symposium on Biomathematics and Ecology Education and Research*, Web. 23 April, 2014. <http://cas.illinoisstate.edu/ojs/index.php/beer/article/view/796/779>. Accessed 20 February 2016.
- [5] Center for Undergraduate Research in Mathematics. <http://curm.byu.edu/>. Accessed June 2016.
- [6] Council on Undergraduate Research: Frequently asked questions. http://www.cur.org/about_cur/frequently_asked_questions_#2. Accessed June 2016.

¹Michael Dorff, Allison Henrich, Lara Pudwell, *A Mathematician's Guide to Mentoring Undergraduate Research*, AMS/MAAPress, Classroom Resource Materials, vol. 63, 2019.

- [7] Das, K., From inquiry-based learning to student research in an undergraduate mathematics program, *PRIMUS: Problems, Resources and Issues in Mathematics Undergraduate Studies*, **23** (2013), no. 9, 829–836.
- [8] Dietz, J., Creating a culture of inquiry in mathematics program, *PRIMUS: Problems, Resources and Issues in Mathematics Undergraduate Studies*, **23** (2013), no. 9, 837–859.
- [9] Dorff, M., Nonacademic careers, internships and undergraduate research, J. Gallian, ed. *Involve, A Journal of Mathematics*, **7** (2014), no. 3, 303–313. Providence, RI: American Mathematical Society.
- [10] Dorff, M., Hall, L., Solids in \mathbb{R}^n whose area is the derivative of the volume, *The College Mathematics Journal*, **34** (2003), no. 5, 350–358.
- [11] Ellis-Monaghan, J., Pangborn, G., An example of practical organization for undergraduate research experiences, *PRIMUS: Problems, Resources, and Issues in Mathematics Undergraduate Studies*, **23** (2013), no. 9, 805–814.
- [12] Etingof, P., Gerovitch, S., Khovanova, T., Mathematical research in high school: The PRIMES experience, *Notices of the American Mathematical Society*, **62** (2015), no. 8, 910–918.
- [13] Gillman, R., Szanislo, Z., Academic year research at Valparaiso University. In: *Proceedings of the Conference on Promoting Undergraduate Research in Mathematics*, pp. 279–283, 2007.
- [14] Higgins, A., Ludwig, L., Servatius, B., Papers, posters, and presentations as outlets for undergraduate research, *Involve, A Journal of Mathematics*, **7** (2014), no. 3, 327–333.
- [15] Leonard, K., Adventures in academic year undergraduate research, *Notices of the American Mathematical Society*, **55** (2008), no. 11, 1422–1426.
- [16] McBee, C., Vasilevska, V., Information for faculty new to undergraduate research, *Involve, A Journal of Mathematics*, **7** (2014), no. 3, 395–401.
- [17] Roberts, G., Conducting mathematical research with undergraduates, *PRIMUS: Problems, Resources, and Issues in Mathematics Undergraduate Studies*, **23** (2013), no. 9, 785–797.

تاریخ ارسال: ۹۷/۴/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۹۷/۵/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۵/۲۱

ستار ستاری: دانشجوی دکتری علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف
رایانامه: sattari_s@yahoo.com