



توسعه روش معادلات مجزا برای حل معادله‌ی هلمهولتز با اعمال مستقیم شرایط مرزی

رضا بابایی^۱، ناصر خاجی^۲، محسن میرزاجانی^۳

۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲- دانشیار مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس تهران

r.babae@modares.ac.ir

خلاصه

معادله‌ی حاکم بر توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخازن سدها، معادله‌ی هلمهولتز می‌باشد که تاکنون به روش‌های مختلف تحلیلی و عددی حل شده است. در این پژوهش، معادله‌ی مذکور با استفاده از یک روش نیمه‌تحلیلی جدید به نام "روش معادلات مجزا" در حوزه‌ی فرکانس حل شده و برای اولین بار، شرایط مرزی به‌طور مستقیم در آن وارد گردیده است. در روش معادلات مجزا، فقط مرزهای مسئله با استفاده از المان‌های مرتبه بالای غیرایزوپارامتریک ویژه گسسته‌سازی می‌شود. با بکارگیری چندجمله‌ای‌های مرتبه بالای چیشف به عنوان توابع نگاشت، توابع شکل ویژه، روش انتگرال‌گیری عددی کلنشا-کورتیس، و روند تولید فرم انتگرالی با استفاده از روش باقیمانده‌های وزن‌دار، معادلات حاکم بر مرزها و فضای مخزن سدها به مختصات محلی انتقال داده می‌شود. با این کار، معادلات حاکم برای هر درجه آزادی مستقل از سایر درجات آزادی به دست می‌آید، که این امر، حجم محاسبات را به‌طور چشمگیری نسبت به سایر روش‌ها کاهش می‌دهد. همچنین به منظور صحت‌سنجی محاسبه‌ی توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه‌ی سد با این روش، در مقایسه با حل تحلیلی آن ارائه شده که از دقت قابل قبولی برخوردار است.

کلمات کلیدی: سد وزنی صلب، روش معادلات مجزا، فشار هیدرودینامیکی، شرایط مرزی مخزن سد، حوزه‌ی فرکانس

۱. مقدمه

سدها از مهمترین سازه‌های دست بشر برای آبادانی کشورها هستند که برای حفظ سرمایه‌های جانی و مالی انسان‌ها، باید در برابر خطراتی همچون زلزله مصون باشند. مخزن سد در هنگام وقوع زلزله باعث اعمال یک فشار هیدرودینامیکی به بدنه‌ی سد می‌شود که در اوایل رونق صنعت سدسازی توجه چندانی به این امر مهم در طراحی سدها وجود نداشت. توزیع فشار هیدرودینامیک بر روی سدهای صلب اولین بار توسط وسترگارد [۱] در سال ۱۹۳۳ انجام گرفت. در سال ۱۹۶۷، Chopra یک راه حل تحلیلی برای محاسبه‌ی فشار هیدرودینامیک برای یک سد صلب و قائم ارائه نمود [۲]. از آن سال‌ها تاکنون روش‌های زیادی در آنالیز لرزه‌ی سد و مخزن به کار گرفته شد تا یک راه‌حل مناسب با دقت کافی و کمترین هزینه ارائه شود [۳ و ۴]. در پژوهش حاضر برای اولین بار به منظور ارائه‌ی یک راه‌حل با صرف هزینه‌ی کمتر، از روش معادلات مجزا^۴ برای محاسبه‌ی توزیع فشار هیدرودینامیکی بر روی یک سد وزنی صلب با اعمال مستقیم شرایط مرزی استفاده شده است. این روش یک روش نیمه تحلیلی است که توسط ناصر خاجی و محمد ایمان خداکرمی در سال ۲۰۱۱ با هدف بهبود کاستی‌های دیگر روشهای عددی ابداع شده است [۵]. این ایده از روش بسیار جدید المان مرزی-محدود مقیاس شده^۵ که از مزایای روش المان محدود^۶ و روش المان مرزی^۷ به‌طور هم‌زمان بهره می‌برد، گرفته شده و با اصلاحاتی که در آن انجام شده، حجم

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۲ عنوان عضو هیئت علمی گروه زلزله و سازه دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۳ دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۴ Decoupled Equations Method

^۵ Scaled boundary-finite element method (SBFEM)

^۶ Finite difference method (FDM)

^۷ Boundary elements method (BEM)